



Traitement d'images satellitaires appliqué à la cartographie numérique quantitative de la circulation océanique superficielle

Brigitte Bianchi

► To cite this version:

Brigitte Bianchi. Traitement d'images satellitaires appliqué à la cartographie numérique quantitative de la circulation océanique superficielle. Traitement du signal et de l'image [eess.SP]. Université de Nice Sophia-Antipolis, 1988. Français. NNT : . pastel-00956606

HAL Id: pastel-00956606

<https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00956606>

Submitted on 7 Mar 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

T H E S E

présentée à
L'UNIVERSITE DE NICE

par
Brigitte BIANCHI

en vue de l'obtention du titre de
DOCTEUR EN SCIENCES

Mention : AUTOMATIQUE ET TRAITEMENT DU SIGNAL

TRAITEMENT D'IMAGES SATELLITAIRES
APPLIQUE A LA CARTOGRAPHIE NUMERIQUE QUANTITATIVE
DE LA CIRCULATION OCEANIQUE SUPERFICIELLE

soutenue le 22 Avril 1988, devant un Jury composé de :

MM. BIJAOU I A.	Président
HERVE J.	Rapporteur
MONGET J.M.	Rapporteur
GUILLARD H.	Examineur
WALD L.	Examineur

Centre de Télédétection et d'Analyse des Milieux Naturels
ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DES MINES DE PARIS

RESUME

A partir d'une analyse diachronique de thermographies satellitaires, il est possible de calculer le courant à la surface de l'océan en faisant appel à l'équation de conservation de la chaleur, réduite à une équation d'advection instationnaire.

Les thermographies sont issues des données des satellites de la série NOAA, équipés d'un capteur AVHRR. La résolution de l'équation passe par plusieurs étapes de traitement numérique.

L'obtention des températures réelles de la mer requiert un étalonnage du capteur satellitaire ainsi qu'une correction des effets atmosphériques.

Les thermographies sont rectifiées géométriquement afin de les rendre superposables. Elles sont ensuite filtrées afin d'éliminer les fréquences indésirables. La moyenne des deux thermographies fournira le gradient horizontal et leur différence, la dérivée temporelle. L'interpolation des isothermes en prenant appui sur une transformée en distance permettra d'augmenter le nombre de points de résolution de l'équation pour obtenir une meilleure cartographie du courant.

Le champ de courant sera déterminé le long des isothermes interceptant un ensemble de points pour lesquels la fonction de courant est connue. La détermination automatique de la précision du modèle sera faite en parcourant de manière opposée la démarche utilisée pour calculer la fonction de courant.

L'analyse d'un tourbillon issu du Gulf Stream et du courant dans le golfe du Lion illustre les différentes étapes de ce calcul du courant superficiel.

Cette méthode de détermination du courant marin de surface est délicate à mettre en œuvre car le nombre de points de résolution de l'équation est souvent très faible et il en résulte une cartographie du vecteur courant difficile à réaliser.

Mots-clés: Thermographie satellitaire
Modèle numérique
Filtrage
Transformée en distance
Cartographie

Courant de surface
Rectification géométrique
Interpolation
Gradient thermique

A Jacques,
A mes parents,
A mes amis.

Remerciements

Ce travail a été effectué au centre de Télédétection et d'Analyse des Milieux Naturels (CTAMN) de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris (ENSMP) à Sophia-Antipolis en liaison avec l'Université de Nice.

Je remercie Monsieur J.M. MONGET, directeur du CTAMN de m'avoir accueillie dans son centre et d'avoir bien voulu participer à ce jury.

Je tiens tout particulièrement à remercier Monsieur L. WALD, directeur de cette thèse, grâce à qui j'ai pu réaliser les travaux présentés ici.

Je remercie Messieurs A. BLJAOUI, H. GUILLARD et J. HERVE de leurs conseils et de leur participation à ce jury.

Que toutes les personnes qui m'ont aidée et soutenue depuis le début de ces travaux soient remerciées et trouvent ici l'expression de ma reconnaissance.

CHAPITRE 1

Introduction

Cette thèse traite du traitement d'images satellitaires appliqué à la cartographie numérique quantitative de la circulation océanique superficielle. Les satellites météorologiques fournissent quotidiennement des images de la température de surface de la mer (thermographies). Ces images traduisent l'évolution dynamique de la couche superficielle des océans et nous présentons ici une méthode qui fait appel au traitement d'images afin d'extraire d'un couple de thermographies la cartographie du champ de courant.

Cette méthode fait appel à une équation de conservation de la chaleur. Etant donné un couple de thermographies, on suppose que la variation de chaleur en un point est due à un apport ou perte de chaleur par le courant (advection) et par l'atmosphère. Etant donné la connaissance en un point du vecteur courant, l'équation d'évolution de la température, une fois simplifiée, permet de calculer le vecteur courant tout au long de l'isotherme passant en ce point. La connaissance des variations thermiques spatiales et temporelles requise par cette équation est fournie par le couple de thermographies.

Cet ouvrage présente des algorithmes pour la réalisation numérique de cette méthode. Outre la résolution des problèmes physiques propres à l'équation d'advection, à la mesure depuis l'espace et au transfert radiatif au sein de l'atmosphère, cette réalisation numérique relève également du traitement de l'image. De plus pour faciliter la compréhension du résultat par un océanologue non exercé, les problèmes de cartographie numérique et de perception de la couleur ont été examinés.

La partie 1 présente le principe de l'utilisation de l'équation de la conservation de la chaleur.

La partie 2 montre comment obtenir des thermographies à partir d'images satellitaires.

Les images utilisées sont celles des satellites météorologiques de la série NOAA et sont équipés d'un capteur AVHRR. Le capteur permet de mesurer l'énergie émise par l'ensemble terre-atmosphère. Le traitement de ces

images satellitaires requiert un étalonnage du capteur afin d'obtenir une liaison entre la température des corps au sol et les données en comptes numériques. Le signal émis par la surface de la mer est toutefois perturbé par l'atmosphère. Il faut donc corriger les mesures, à l'aide d'algorithmes simples, pour obtenir les températures réelles de la mer.

Le traitement des images est abordé dans la partie 3.

Les images sont rectifiées géométriquement afin de corriger les effets d'acquisition du satellite et de les rendre superposables dans une projection cartographique choisie. Elles sont ensuite filtrées afin d'éliminer les fréquences indésirables (bruit de mesure, bruit induit par la correction atmosphérique, etc...). La moyenne des deux images fournira le gradient normal à l'isotherme et leur différence, la dérivée temporelle. Pour une meilleure cartographie du courant, il est nécessaire d'augmenter le nombre de points de résolution de l'équation. Ceci est fait en interpolant les isothermes en prenant appui sur une transformée en distance.

Une fois les calculs préliminaires établis, la résolution de l'équation peut être faite (partie 4). Les valeurs initiales de la fonction de courant sont attribuées sur la ligne de côte. Pour le calcul proprement dit il faut distinguer deux cas : les zones raccordées à la côte et celles non raccordées à la côte. Ces dernières ne peuvent être traitées que par une méthode d'ajustement ou de continuité appropriée. La cartographie de la fonction de courant est ensuite densifiée par une interpolation bilinéaire afin d'obtenir une image plus complète. De là le calcul du vecteur courant découle aisément mais sa cartographie demande une attention toute particulière afin qu'elle soit facilement interprétable.

La partie 5 donne quelques exemples de réalisation de la méthode et présente les conclusions et perspectives de l'étude.

CHAPITRE 2

Différentes méthodes de cartographie

Du courant à partir de thermographies

L'idée de cartographier le courant à partir de thermographies n'est pas récente. Passons en revue les différentes méthodes déjà proposées.

Actuellement l'estimation du courant marin est essentiellement faite à l'aide de courantomètres mouillés dans la veine de courant. Les mesures sont de très bonne qualité mais restent ponctuelles, c'est-à-dire ne reflétant que la valeur du courant en un point de l'espace. La cartographie du champ de courant est donc effectuée au moyen de méthodes d'interpolation spatiale (krigeage, analyse objective) fondées sur des hypothèses réalistes. Par contre, les thermographies (cartes de la température de surface de l'océan) obtenues par satellite couvrent de grands espaces de manière instantanée. Quoiqu'on ne puisse connaître directement la température de la couche de mélange, ces images offrent la possibilité d'estimer précisément et la température absolue en chaque point (généralement $1 \times 1 \text{ km}^2$) et les variations spatiales de celle-ci. Il est donc assez tentant d'utiliser les images satellitaires pour guider l'interpolation spatiale des mesures courantométriques. En effet, il existe généralement une relation étroite entre la dynamique océanique et la distribution spatiale de la température qui agit comme un traceur passif (cf. Wald, 1985, par exemple).

En fait, nous avons voulu aller plus loin en examinant la possibilité d'estimer directement le courant superficiel à l'aide de thermographies uniquement, les courantomètres servant alors à connaître la troisième dimension (verticale) du champ de courant.

Plusieurs approches sont a priori possibles pour l'estimation du courant superficiel à partir de thermographies satellitaires. Trois ont été examinées : deux font appel aux équations de la dynamique océanique tandis que la troisième est plus intuitive.

2.1 Equation géostrophique ou du vent thermique

Cette première méthode est très proche de la méthode dynamique puisqu'elle utilise l'équation géostrophique en assimilant toutefois gradient de densité et gradient de température.

En première approximation le courant peut être décrit par l'équation suivante, dite géostrophique ou du vent thermique :

$$\partial V / \partial z = - (g / \rho f) \nabla_h \rho \quad (2.1)$$

où :

V = vitesse du courant,

z = profondeur,

ρ = masse volumique,

g = constante gravitationnelle,

f = paramètre de Coriolis,

∇_h = gradient horizontal.

Si l'on connaît un niveau de référence z_0 pour lequel $V = 0$, alors on peut estimer la vitesse en surface (méthode dite "dynamique").

Si l'on suppose que la masse volumique ρ est essentiellement régie par la température (salinité constante), on obtient alors une relation entre V et le gradient thermique. Wald, Nihous (1980) ont étudié la corrélation entre les gradients thermiques moyens, dérivés des moyennes bi-mensuelles de thermographies VHRR de la mer Ligure, et les courants calculés sur la radiale Nice-Calvi suivant la méthode dynamique. Si les distributions des gradients thermiques correspondent à celles induites par une circulation cyclonique dans les hypothèses du vent thermique et de la décroissance du courant avec la profondeur (excepté en février-mars où le refroidissement atmosphérique joue un rôle primordial sur la température de surface), par contre, il n'a pas été possible de trouver une relation entre les modules des vitesses et des gradients thermiques. Dans ce cas là les variations de la salinité ne peuvent être négligées et cette méthode est à rejeter. Il faut également ajouter à sa charge que cette méthode prédit le parallélisme des isotachs et des isothermes, qui n'est vérifié que pour les forts courants océaniques.

2.2 Suivi des structures

Cette deuxième méthode plus intuitive, consiste à examiner deux thermographies successives et à retrouver des structures de forme identique sur chaque image. On suppose alors que ces structures sont les mêmes et qu'elles se sont déplacées sous l'influence unique du courant marin. La mesure du déplacement divisée par le temps séparant chaque thermographie donnera alors la vitesse du courant.

Cette méthode a été utilisée en particulier par Tanaka et al. (1982) pour estimer la vitesse d'écoulement du Kuro-Shio, par Millot, Wald (1980) pour le courant ligure et par Ninnis et al. (1986) qui utilise la méthode du "Maximum Cross-Correlation" (MCC) pour détecter le déplacement des icebergs dans la mer du Beaufort. Cette méthode est donc peu utilisable pour l'estimation du courant, dont d'ailleurs elle ne donne que la composante normale aux structures que l'on suit.

2.3 Equation de conservation de la chaleur

Notons que ces deux premières méthodes ne font appel qu'à la connaissance du gradient thermique. Cette troisième méthode utilise également la valeur de la température en chaque pixel. Un peu plus complexe, elle fait appel à l'équation de conservation de la chaleur, réduite à une équation d'advection instationnaire. Cette méthode n'a été que très rarement employée jusqu'à présent (Saunders, 1973 ; Vukovich, 1974 Wald, 1985).

Elle suppose que la variation de chaleur en un point est due à un apport ou perte de chaleur par le courant (advection) et par l'atmosphère. Etant donné la connaissance en un point du vecteur courant, l'équation d'évolution de la température, une fois simplifiée, permet de calculer le vecteur courant tout au long de l'isotherme passant en ce point. La connaissance des variations thermiques spatiales et temporelles requise par cette équation est fournie par un couple de thermographies acquises par satellite.

PARTIE 1

Le modèle physique et

Sa résolution numérique

CHAPITRE 3

Utilisation de l'équation

De conservation de la chaleur

3.1 Principe

Nous reprenons ici la discussion qui en a été faite par Wald (1985).

Soit une couche superficielle de propriétés homogènes verticalement et animée d'un mouvement non-divergent dans le plan horizontal (O, x, y) , de vitesse $\vec{U}(x, y)$. Supposons également que les variations à court terme (de l'ordre de la journée) de la température de surface, $T(x, y)$, sont essentiellement dues à l'advection horizontale de chaleur ainsi qu'aux échanges thermiques entre cette couche et l'atmosphère et la couche sous-jacente, la diffusion thermique latérale étant négligée. De l'équation de conservation de la chaleur, on peut alors obtenir l'équation suivante, où les indices x, y, t et h (horizontal) désignent les dérivées partielles et où $Q(x, y)$ est proportionnel à la somme sur une journée des échanges verticaux de chaleur :

$$T_t(x, y) + \vec{U}(x, y) \cdot \vec{\nabla}_h T(x, y) = Q(x, y) \quad (3.1)$$

Pour cet écoulement non-divergent, il existe une fonction de courant, ψ , telle que :

$$\vec{U}(x, y) = (u, v) \quad ; \quad u(x, y) = -\psi_y \quad ; \quad v(x, y) = \psi_x \quad (3.2)$$

D'où :

$$T_t - \psi_y T_x + \psi_x T_y = Q \quad (3.3)$$

qui est l'équation de base de cette méthode de calcul de champ de courant superficiel à l'aide de thermographies.

En effet, étant donné deux thermographies successives, on peut calculer en chaque point les dérivées partielles suivant t, x et y . Si Q est connu et si la fonction de courant est connue en quelques points, alors les équations (3.2) et (3.3) donnent le champ de courant superficiel.

La diffusion horizontale peut être introduite dans l'équation (3.3).
Ce terme s'écrit :

$$K_h (T_{xx} + T_{yy}) \quad (3.4)$$

où K_h est le coefficient de diffusion horizontale. Le laplacien peut être calculé à partir des thermographies. La difficulté d'introduction de ce terme de diffusion réside alors dans une estimation adéquate de K_h .

La fonction de courant définie par l'équation (3.3) n'est pas unique (Saunders, 1973). Si $\psi(x,y)$ satisfait (3.3), il en est de même pour la fonction somme : $\psi(x,y) + \phi(T(x,y))$, où $\phi(T)$ est une fonction arbitraire, qui en chaque point est parallèle aux isothermes :

$$-\phi_y T_x + \phi_x T_y = 0 \quad (3.5)$$

Pour définir une solution unique, il est nécessaire de disposer d'une valeur de la fonction de courant sur chaque isotherme.

Ces valeurs initiales peuvent être données par la ligne de côte, qui est une ligne de courant à laquelle peut être attribuée une valeur arbitraire. Cette condition initiale détermine alors une fonction de courant unique, le long des isothermes aboutissant à la côte. Elle peut être remplacée par tout autre ensemble de points pour lesquels la fonction de courant est connue. La fonction de courant sera alors déterminée le long des isothermes interceptant l'un de ces points.

3.2 La résolution numérique

La variation de la fonction de courant à travers le champ de courant est prédite par l'équation (3.3). Etant donné que la variation de la fonction de courant s'écrit aussi :

$$d\psi = \psi_x dx + \psi_y dy \quad (3.6)$$

la dépendance linéaire des équations (3.3) et (3.6) annule leur déterminant, d'où l'"équation caractéristique" :

$$T_x dx + T_y dy = dT = 0 \quad (3.7)$$

Cette équation établit une dépendance entre les déplacements dx et dy , qui définit une courbe appelée "caractéristique". La valeur initiale de la fonction de courant va se "propager" (au sens résolution numérique) le long de ces caractéristiques à travers la zone géographique considérée. Ici, les caractéristiques sont les isothermes.

On a également les relations suivantes :

$$dx / T_y = - dy / T_x = d\psi / (Q - T_t) \quad (3.8)$$

A chaque pas le long d'une isotherme, ψ sera incrémentée d'une des quantités équivalentes suivantes :

$$(Q - T_t)dx / T_y \quad \text{ou} \quad - (Q - T_t)dy / T_x \quad (3.9)$$

On peut comprendre le résultat précédent en écrivant l'équation (3.3) dans les coordonnées naturelles. Si s désigne la coordonnée curviligne et n la coordonnée normale, on obtient :

$$T_t + T_n \psi_s = Q \quad (3.10)$$

d'où l'on tire la variation $\Delta\psi$ le long d'une isotherme :

$$\Delta\psi = (Q - T_t) \Delta S / T_n \quad (3.11)$$

équation équivalente à (3.8).

Il faut bien comprendre que les isothermes ne sont pas considérées a priori comme des lignes de courant. Elles servent de supports de calcul, en chaque point desquels on pourra calculer la fonction de courant.

Les isothermes seront parallèles aux lignes de courant lorsque le terme $(Q - T_t)$ sera nul ou lorsque :

$$(Q - T_t) / T_n \ll 1 / \Delta S \quad (3.12)$$

ce qui pourra avoir lieu, par exemple, en présence d'un gradient thermique horizontal très prononcé et permanent, comme le bord du Gulf Stream.

L'angle θ entre l'isotherme et le vecteur courant peut être quelconque. En réécrivant l'équation (3.1) comme suit :

$$U \nabla_h T \cos \theta = Q - T_t \quad (3.13)$$

on obtient :

$$\theta = \text{Arcos}[(Q - T_t) / (U \nabla_h T)] \quad (3.14)$$

Le schéma de résolution numérique est simple et consiste à discrétiser l'équation (3.8), ou (3.9), en différences finies centrées.

3.3 Commentaires sur la généralité de la méthode

L'équation (3.1) est a priori valide pour la chaleur. Elle l'est aussi pour la température comme le montre la discussion suivante. La relation entre la chaleur C et la température est :

$$dC = \rho c_p dT \quad (3.15)$$

où :

c_p : capacité calorifique à pression constante,
 ρ : masse volumique.

Si la masse volumique de l'eau augmente légèrement avec la salinité :

- eau pure, $\rho = 1000$ u.s.i. ,
- salinité 37 ‰ , $\rho = 1028$ u.s.i. (soit 3 ‰),

cependant, c_p décroît avec la salinité. A 15°C :

- eau pure, $c_p = 1,004$ u.s.i.,
- salinité 40 ‰ , $c_p = 0,9476$ u.s.i..

Par ailleurs, les variations de c_p avec la température sont inférieures à 0,3 % dans l'intervalle 15°C - 30°C. Le produit ρc_p varie donc très peu avec la température et la salinité (environ 2 % dans le cas du débouché d'un fleuve), et on peut dans tous les cas, remplacer la variable chaleur par la variable température.

L'équation de base (3.1) semble parfaitement adaptée à la description de la plupart des mouvements océaniques. Toutefois les calculs précédents montrent l'importance du terme d'échanges thermiques $Q(x,y)$. Il est très difficile d'estimer ce terme en chaque point.

En situation stable, les échanges thermiques se font principalement

avec l'atmosphère (gain le jour pour l'océan et perte la nuit) et s'annulent sur le cycle d'une journée. Dans cette situation, l'équation (3.1) est tout à fait justifiée.

Par contre, en situation instable (coup de vent brusque, par exemple), il y a modification de l'épaisseur de la thermocline et par conséquence une modification du contenu thermique, indépendamment de toute advection. Les flux verticaux ne sont plus négligeables et le flot est divergent. La situation est alors plus complexe et il faut dans chaque cas évaluer la validité de l'équation (3.1).

Sur la figure (3.1) est représentée la carte de la profondeur normalisée de la thermocline calculée d'après un modèle numérique (Hua, 1981) du golfe du Lion, 24 heures après le début d'un coup de vent. Il y a diminution de l'épaisseur de la thermocline dans la majeure partie du bassin (nombres positifs) indiquant les upwellings côtiers et augmentation (nombres négatifs) dans la partie sud-ouest, donc une variation spatiale importante de l'épaisseur.

Toutefois il est vraisemblable que l'équation (3.1) est encore vérifiée dans certaines de ces situations instables. Si la température de l'air avant et durant le coup de vent reste la même, de même que l'humidité, les processus d'évaporation resteront les mêmes et les échanges avec l'atmosphère s'annuleront sur une journée. Quant à la modification de la température de surface par approfondissement de la thermocline en plein océan, on peut voir sur la figure (3.2), qui montre les profils verticaux de température, en fonction du temps, déduits d'un modèle numérique (Guillard, 1984), que sur 24 heures, la variation de la température de surface est inférieure à $0,1^{\circ}\text{C}$ (il ne faut pas tenir compte de la variation au cours des premières heures, le profil initial étant irréaliste).

En conclusion, il convient d'examiner chaque cas et d'évaluer précisément si l'équation (3.1) est justifiée. Dans le cas d'un flot divergent, cette équation pourra être appliquée si les phénomènes sont bien marqués et sont à l'évidence le résultat d'une advection de chaleur. L'approximation faite, si elle peut être quantifiée, pourra être prise en compte en majorant l'erreur connue sur la dérivée temporelle de la

température.

Dans la plupart des cas et pour des échelles de temps de l'ordre de la journée, le terme Q sera négligé. De plus, si les échanges avec la couche sous-jacente sont faibles, on peut alors supposer que sur une journée la variation thermique en un point est entièrement due à l'advection horizontale de chaleur et ainsi poser Q nul partout.

Dans d'autres cas où le champ $Q(x,y)$ ne peut être supposé connu a priori (et non nul), il peut être évalué aux points où le gradient thermique est nul, points auxquels l'équation (3.1) se résume à :

$$T_t(x,y) = Q(x,y) \quad (3.16)$$

Ensuite le champ $Q(x,y)$ peut être reconstruit à partir de ces points par une technique d'interpolation appropriée ou plus simplement en le supposant constant spatialement. C'est ce qui a été fait dans cet ouvrage. Une autre technique pourrait être fondée sur l'analyse comparative des histogrammes de chaque thermographie, le terme Q , supposé alors constant spatialement, étant déterminé par ajustement de certaines caractéristiques des histogrammes.

Enfin il faut préciser que quelle que soit la méthode employée pour la cartographie (advection ou MCC, cf. § 2.2), le champ thermique observé sur les thermographies peut n'être dû qu'au passage d'une onde de basse fréquence (Brown, Evans, 1980 ; Crépon et al., 1982 ; Harris et al., 1978) et dans ce cas, la vitesse estimée n'est que la vitesse de phase de l'onde, qui peut éventuellement être opposée au courant.

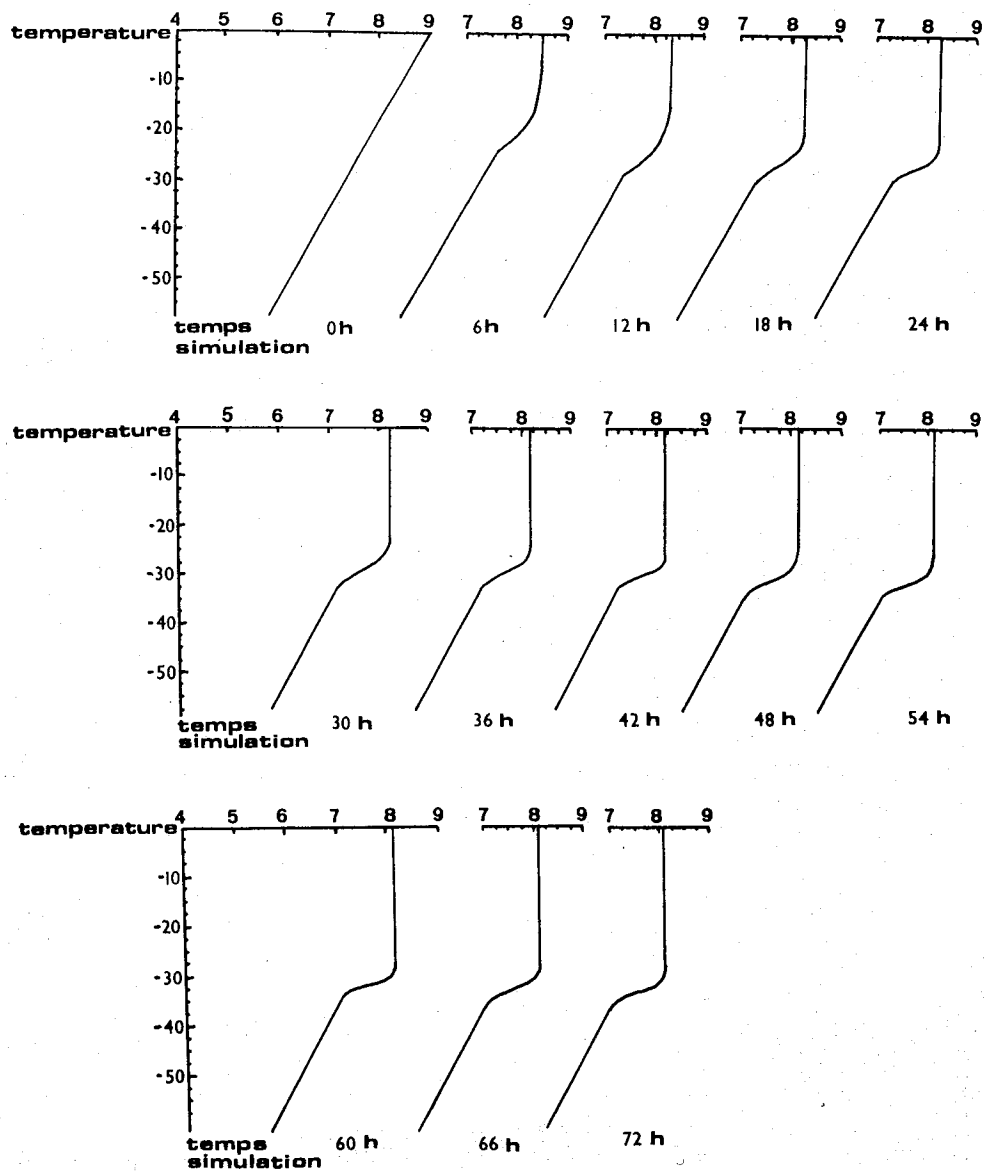


fig. 3.2 Evolution dans le temps du profil vertical de température après le début d'un coup de vent, d'après un modèle numérique (Guillard, 1984).

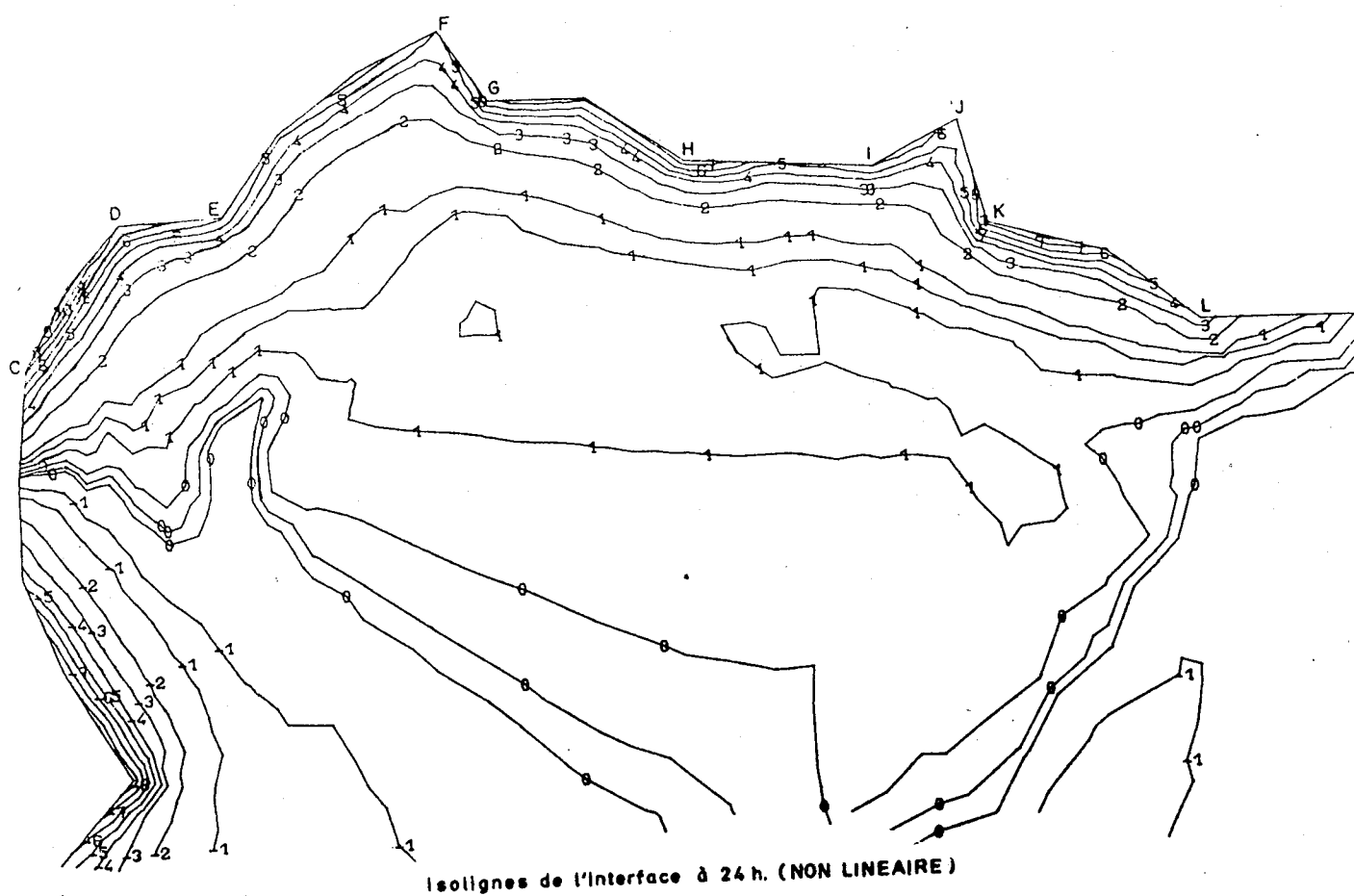


fig. 3.1 Carte de la profondeur normalisée de la thermocline dans le golfe du Lion, 24 heures après le début d'un coup de vent, d'après un modèle numérique (Hua, 1981).

3.4 Présentation du traitement numérique

Le progiciel calculant le courant marin de surface à partir de thermographies satellitaires est un logiciel volumineux et constitué de plusieurs étapes de traitement numérique. En bref, les données satellitaires sont décodées, sectorisées et recalées géométriquement. On en extrait ensuite les gradients horizontaux et temporels. Ces gradients, ainsi que les structures thermiques sont introduits dans un modèle numérique qui fournit une fonction de courant d'où sera calculé le champ de courant.

Les étapes du traitement numérique sont les suivantes :

1. lecture de la première image satellitaire sur bande magnétique,
2. sectoriser et étalonner l'image,
3. réaliser une correction atmosphérique,
4. idem pour la deuxième image,
5. rectifier géométriquement les images par rapport à un fond de carte,
6. confectionner un masque (côtes, nuages),
7. filtrer les fréquences parasites,
8. calculer l'image moyenne,
9. calculer l'image dérivée temporelle,
10. réaliser une image des contours pour l'image (8) en tenant compte du masque (6),
11. interpoler les isothermes de l'image (8) (transformée en distance),
12. calculer le gradient thermique,
13. initialiser la fonction de courant,
14. calculer la fonction de courant,
15. traiter les zones non raccordées,
16. densifier la fonction de courant par interpolation bilinéaire,
17. cartographier la fonction de courant,
18. calculer le vecteur courant,
19. réaliser une cartographie du vecteur courant.

Toutes ces étapes sont développées dans les chapitres suivants.

PARTIE 2

Obtention des thermographies

A partir d'images satellitaires

CHAPITRE 4

Etalonnage du capteur satellitaire

Et corrections atmosphériques

4.1 Etalonnage du capteur AVHRR des satellites NOAA

La télédétection par satellite est une méthode d'observation de la terre utilisant le rayonnement électromagnétique comme porteur d'information. Chaque satellite est équipé d'un radiomètre utilisant plusieurs capteurs permettant une mesure simultanée. Chaque capteur mesure l'énergie reçue par le satellite dans un intervalle de longueur d'onde appelé bande spectrale. La bande spectrale utilisée ici est celle de l'infrarouge moyen (10 - 12 μm) où le phénomène dominant est l'émission. Le radiomètre mesure alors le rayonnement émis par la surface de la mer et qui dépend de la température de celle-ci. L'atmosphère absorbe une partie de ce rayonnement et émet elle-même à sa température propre selon le même facteur d'absorption. La température T mesurée depuis le satellite, peut, en première approximation, s'exprimer ainsi :

$$T = T_{\text{mer}} t + T_{\text{atm}} \quad (4.1)$$

où :

T_{atm} = température de l'atmosphère,
 t = facteur de transmission de la couche atmosphérique,
 T_{mer} = température de la surface de la mer.

Le signal provenant de la mer est masqué par le signal atmosphérique. L'étalonnage du capteur permet de transformer les mesures en températures ainsi que d'éliminer les composantes atmosphériques.

Les satellites météorologiques de la série NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) ont des orbites quasi-polaires et héliosynchrones, c'est-à-dire qu'ils survolent une même zone à la même heure locale, ils ont une période de révolution de 102 minutes et une altitude moyenne de 850 km. Ces satellites sont équipés d'un radiomètre AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) qui est un système à balayage perpendiculaire à l'avancée du satellite, à 4 ou 5 canaux. Les

fonctions de réponse spectrale varient fortement d'un capteur à l'autre, et il faut en tenir compte lors de la conversion des mesures en température.

Le radiomètre AVHRR comprend cinq canaux, dont un dans le visible (C1), un dans le très proche infrarouge (C2), et trois autres dans l'infrarouge proche et moyen (C3, C4 et C5). Les bandes spectrales de AVHRR sont les suivantes :

<u>canal</u>	<u>bande spectrale (μm)</u>
1	00,580 - 00,68
2	00,725 - 01,10
3	03,550 - 03,93
4	10,500 - 11,30
5	11,500 - 12,50

Les deux premiers canaux donnent des mesures de luminance que l'on peut transformer en réflectance à l'aide d'un étalonnage externe. Par contre, ce radiomètre est équipé d'un système d'étalonnage interne, qui permet la transformation des données (comptes numériques, CN) des trois derniers canaux en mesures de la température des corps au sol.

Le principe de ce système est le suivant : on vise successivement, dans chaque canal, deux corps noirs dont les températures sont contrôlées, et l'on établit ainsi une relation entre les comptes numériques et les températures. Ces deux corps noirs sont constitués par le vide intersidéral et par un radiateur interne au radiomètre, dont la température est voisine de 15°C.

En réalité, il s'ajoute à ce principe simple une certaine complexité. Si les comptes numériques (CN) sont liés linéairement à la luminance, par contre, la relation liant luminance et température (relation intégrale de Planck) n'est pas simple et sera résolue numériquement pour chaque radiomètre en service, en fonction de la réponse spectrale des détecteurs.

C'est pourquoi il est nécessaire, au cours du processus d'étalonnage, de convertir les CN en luminances, puis les luminances en températures.

La température du corps noir est contrôlée par quatre thermistances dites PRT (Platinum Resistance Thermometer). Pour chaque ligne de l'image, est enregistrée une valeur de PRT. Toutes les cinq lignes, on trouve, au lieu de la PRT, une valeur de référence qui permet de connaître, pour chaque ligne, la PRT qui lui est associée.

Sur toute la sous-scène, ces valeurs (exprimées en CN) seront sommées, puis transformées en températures grâce à un algorithme de conversion propre à chaque satellite, et enfin moyennées arithmétiquement. Cette température moyenne est appelée température cible. On calcule ensuite la luminance cible correspondante (notée N_c) grâce à une table de conversion calculée numériquement pour chaque canal et chaque radiomètre, au moyen de paramètres fournis par la NOAA à la mise en service du capteur. De même, on calcule un CN moyen correspondant aux visées de ce corps noir par le radiomètre dans les différents canaux. Pour chaque ligne de l'image, sont enregistrés dix groupes de trois valeurs (une valeur par canal thermique). On établit un histogramme de ces visées-cible pour chaque canal et pour toute la sous-scène, et le mode de chaque histogramme est le CN caractéristique de la visée de la cible pour chaque canal (noté X_c).

Le deuxième corps noir est constitué par le vide intersidéral, dont la température est voisine de 0 K. Cependant, la luminance associée (N_{sp}) ne sera pas considérée comme nulle dans les canaux 4 et 5, afin de tenir compte de la non-linéarité de la réponse des détecteurs employés.

Enfin, de même que pour la cible, on calcule un histogramme des visées du vide dans chaque canal, dont on tire un CN vide, noté X_{sp} .

A l'aide des deux points précédemment définis, on peut établir une relation linéaire entre CN et luminance. Si G est le gain, B l'ordonnée à

l'origine, N la luminance, et X le CN, on écrira :

$$N = GX + B \quad (4.2)$$

avec :

$$G = (N_{sp} - N_c) / (X_{sp} - X_c) \quad (4.3)$$

$$B = N_{sp} - G X_{sp} \quad (4.4)$$

Pour chaque canal de chaque radiomètre, on peut établir une table de conversion luminance - température (relation de Planck) à partir de paramètres fournis par la NOAA dans ses documents techniques. C'est cette table qui est employée pour transformer les luminances obtenues par la relation précédente, en températures.

4.2 Correction des effets atmosphériques

L'atmosphère transforme le signal émis par la surface de la mer en l'atténuant et en y ajoutant son émission propre qui est fonction des profils verticaux de température et de contenu en vapeur d'eau et, dans une moindre mesure, des autres constituants de l'atmosphère. L'apparition de radiomètres multispectraux a permis la réalisation d'algorithmes simples et efficaces n'utilisant que les mesures satellitaires afin de corriger ces effets atmosphériques et de retrouver la température réelle de la mer.

En effet, pour un même objet, le radiomètre donne des réponses différentes dans chaque canal. Ces différences sont dues aux variations de la perturbation atmosphérique avec la longueur d'onde et leur connaissance permet l'élimination des effets atmosphériques. Le lecteur est invité à se reporter aux travaux de Deschamps, Phulpin (1980), Prabhakara et al. (1974), Kozlov (1978) et Horman (1976), parmi d'autres auteurs, pour une description détaillée du principe de ces méthodes de correction.

La température réelle de la mer, T_{mer} , est obtenue à partir des températures radiométriques, T_k , des canaux k à l'aide d'une relation linéaire :

$$T_{\text{mer}} = a_0 + \sum_{k=1}^n a_k T_k \quad (4.5)$$

où les coefficients a_k dépendent des coefficients d'absorption de la vapeur d'eau. La constante a_0 doit être ajoutée pour prendre en compte les effets spectralement constants ou quasi-constants tels que la réflexion diffuse à la surface de la mer de la luminance de l'atmosphère et l'émission du gaz carbonique (tableau 4.1).

Les coefficients a_k peuvent être estimés en simulant divers types d'atmosphère (Deschamps, Phulpin, 1980 ; Llewellyn-Jones et al., 1984), ou être estimés de manière empirique en ajustant statistiquement la relation (4.5) sur un ensemble de mesures de température in situ et radiométriques

(McClain et al., 1983 ; Strong, McClain, 1984 ; Centre d'Etudes en Météorologie Spatiale, CEMS, de Lannion). Dans ce cas, l'ajustement des coefficients a_k permet de prendre partiellement en compte la méconnaissance de l'émissivité de la mer, des étalonnages, de l'absorption du CO_2 , etc...

Ces algorithmes donnent tous à peu près les mêmes résultats, à 1 ou 2°C près, ce qui montre la fiabilité et la robustesse de ce genre d'approche. Quant à l'écart-type, il est d'environ 0,5 - 0,7°C pour des valeurs de température allant de 0 à 30°C (Wald, 1985). Il s'avère en fait que le biais est nul, la température moyenne estimée étant égale à la température moyenne observée.

Pour la correction des effets atmosphériques des images satellitaires du golfe du Lion, il faut prendre les coefficients a_k donnés par le CEMS de Lannion ($a_0 = 1$, $a_1 = 3$, $a_2 = -2$).

Soient T_1 et T_2 les températures (respectivement) des canaux C4 et C5 (en Kelvin), alors l'algorithme s'écrit :

$$T_{\text{mer}} (^{\circ}\text{C}) = a_0 - 273 + a_1 T_1 + a_2 T_2 \quad (4.6)$$

si T'_1 et T'_2 désignent les températures exprimées en Celsius, alors :

$$T_{\text{mer}} (^{\circ}\text{C}) = a_0 + 273(a_1 + a_2 - 1) + a_1 T'_1 + a_2 T'_2 \quad (4.7)$$

Les images satellitaires sont codées en octets, c'est-à-dire avec des valeurs allant de 0 à 255. Pour obtenir une thermographie, il faut donc coder les températures. Pour des images de température moyenne 25 - 27°C, on peut adopter le codage suivant, où CN désigne le compte numérique (de 0 à 255)

$$T_{\text{mer}} (^{\circ}\text{C}) = 0,1 \cdot \text{CN} + 15 \quad (4.8)$$

alors :

$$\text{CN} = 10 \cdot (T_{\text{mer}} - 15) \quad (4.9)$$

soit :

$$CN = D_0 + D_1 CN_1 + D_2 CN_2 \quad (4.10)$$

avec CN_1 et CN_2 désignant les comptes numériques de codage de T_1 et T_2 ,
c'est-à-dire avant la correction atmosphérique :

$$T_1 \text{ (°K)} = 273 + 0,2CN_1 \quad (4.11)$$

$$T_2 \text{ (°K)} = 273 + 0,2CN_2 \quad (4.12)$$

En injectant dans (4.9) les termes correspondants aux équations (4.7), (4.11) et (4.12) et en égalisant avec (4.10) on obtient :

$$D_0 = 10*[a_0 + 273*(a_1 + a_2 - 1) - 15] = -140$$

$$D_1 = 2a_1 = 6$$

$$D_2 = 2a_2 = -4$$

	auteurs	a_0	a_1	a_2	a_3
2 canaux 11 - 12 μm	Deschamps Phulpin	- 2,18	3,626	- 2,626	--
	McClain et al. (jour)	- 10,93	4,081	- 3,046	--
	McClain et al. (nuit)	- 23,23	4,243	- 3,168	--
	Strong McClain	- 10,21	3,165	- 2,58	--
	CEMS Lannion	1	3	- 2	--
3 canaux 3,7-11-12 μm	Deschamps Phulpin	0,14	1,002	1,126	- 1,128
	McClain et al. (jour)	- 16,55	1,038	1,060	- 1,038
	Strong McClain	- 3,58	0,97	1,017	- 0,97

Tableau 4.1 Coefficients a_k d'estimation linéaire de la température de surface à partir de la température radiométrique observée dans les fenêtres spectrales du capteur AVHRR, d'après divers auteurs. Les températures sont données en Kelvin.
In Wald, 1985.

PARTIE 3

Traitement des images :

Géométrie d'acquisition, filtrage, gradient et

Interpolation

CHAPITRE 5

Modification de la géométrie

D'acquisition des images

La rectification géométrique consiste à passer de la géométrie d'acquisition de l'image à une autre géométrie choisie. Dans notre étude, cette rectification se décompose en deux parties : les corrections simples de la géométrie d'acquisition qui donnent des pixels carrés et le changement de projection cartographique.

Il est nécessaire de disposer d'images satellitaires ayant la même projection cartographique et étant ainsi superposables les unes aux autres. Pour ce faire, deux techniques sont possibles : le calcul analytique ou l'estimation statistique avec prise d'amers.

5.1 Egalisation des pixels de l'image

Généralement, l'acquisition d'une image satellitaire s'effectue à l'aide d'un radiomètre à balayage dont l'angle solide de visée est constant. Le miroir visant la terre tourne autour d'un axe parallèle à l'axe de vol du satellite, effectuant une rotation en quelques millisecondes, une rotation complète constituant alors une ligne de l'image. C'est le mouvement d'avancée du satellite qui, juxtaposant les lignes successivement, créera l'image entière.

Durant l'acquisition de l'image, la terre tourne sur elle-même, et, par conséquent, décale l'origine des lignes par rapport à la trace au sol de l'orbite.

Par ailleurs, si le satellite a un mouvement sud-nord au moment de l'acquisition, alors la première ligne de l'image (première ligne acquise) sera la plus sud, et la dernière ligne sera la plus nord. L'image apparaîtra donc renversée.

Enfin, étant donné que l'acquisition s'effectue par balayage, à angle solide de visée constant, et que la terre est sphérique, la surface des pixels n'est pas constante le long d'une ligne et varie en $(1 + \sin \mu)$, où μ est l'angle de visée (figure 5.1).

Ces trois déformations sont corrigées à l'aide de formules trigonométriques sphériques. Les surfaces des pixels sont ainsi uniformisées, chaque pixel représentant maintenant une surface de $1 \times 1 \text{ km}^2$.

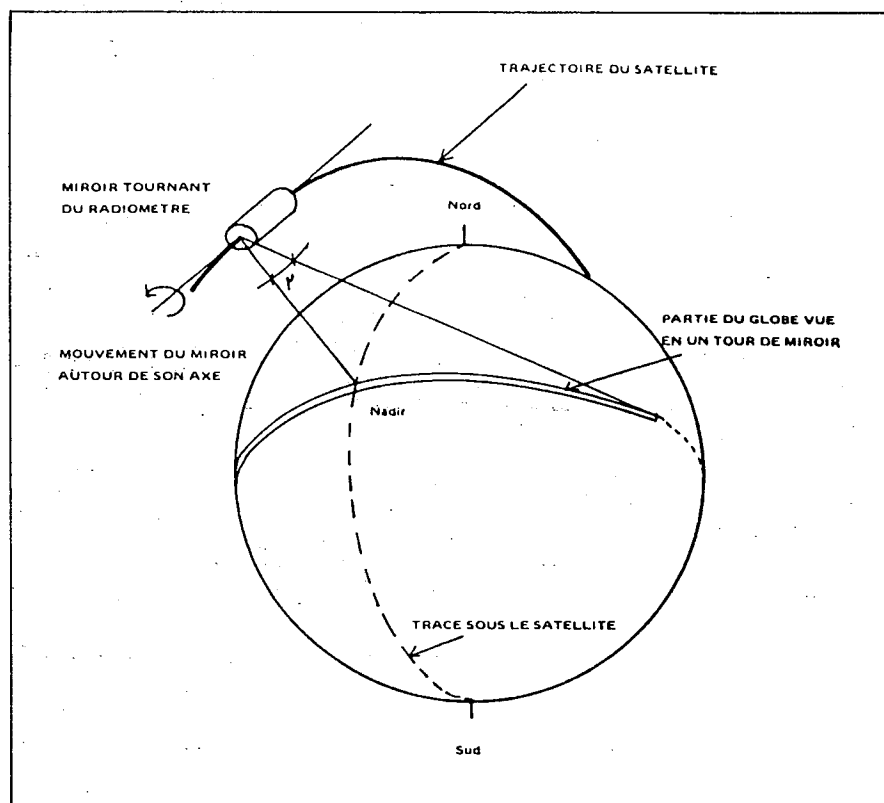


fig. 5.1 Caractéristiques géométriques du balayage par le miroir tournant du radiomètre (NOAA).

5.2 Mise en coincidence géométrique des images par méthode analytique

Si les paramètres d'orbite du satellite, ainsi que les paramètres d'attitude (roulis, tangage, lacet) sont connus avec précision au moment de l'acquisition, alors il est possible de calculer analytiquement la position géographique de chaque pixel, puis de recalculer sa position dans la cartographie choisie.

Il faut ainsi calculer l'arc de cercle terrestre correspondant à une différence de colonnes d'image (figure 5.2).

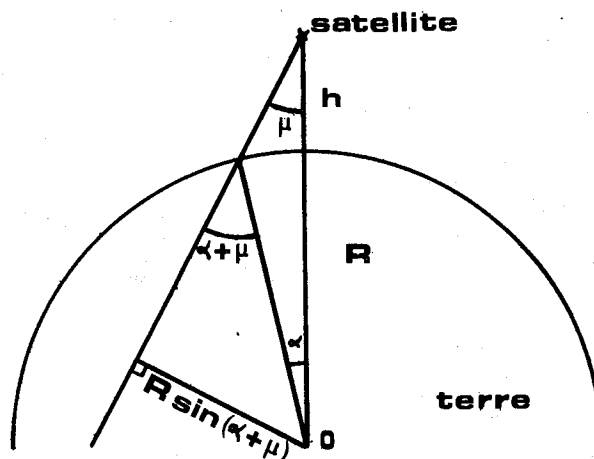


fig. 5.2 Paramètres géométriques terrestres et satellitaires.

où :

- O = centre de la terre,
- h = altitude du satellite,
- R = rayon de la terre (6400 km),
- μ = angle de visée du satellite,
- α = angle correspondant.

Il s'agit de déterminer la relation entre α et μ . Nous avons :

$$R \sin(\alpha + \mu) = (R + h) \sin \mu \quad (5.1)$$

soit :

$$\alpha = -\mu + \text{Arcsin}[(1 + h/R) \sin\mu] \quad (5.2)$$

Il faut de plus trouver les relations liant les paramètres d'orbite et les points au sol.

Soit le point P_1 , point sous satellite, de longitude λ_1 et de latitude ϕ_1 et soit (C) le grand cercle passant par P_1 , trace de la trajectoire instantanée (figure 5.3).

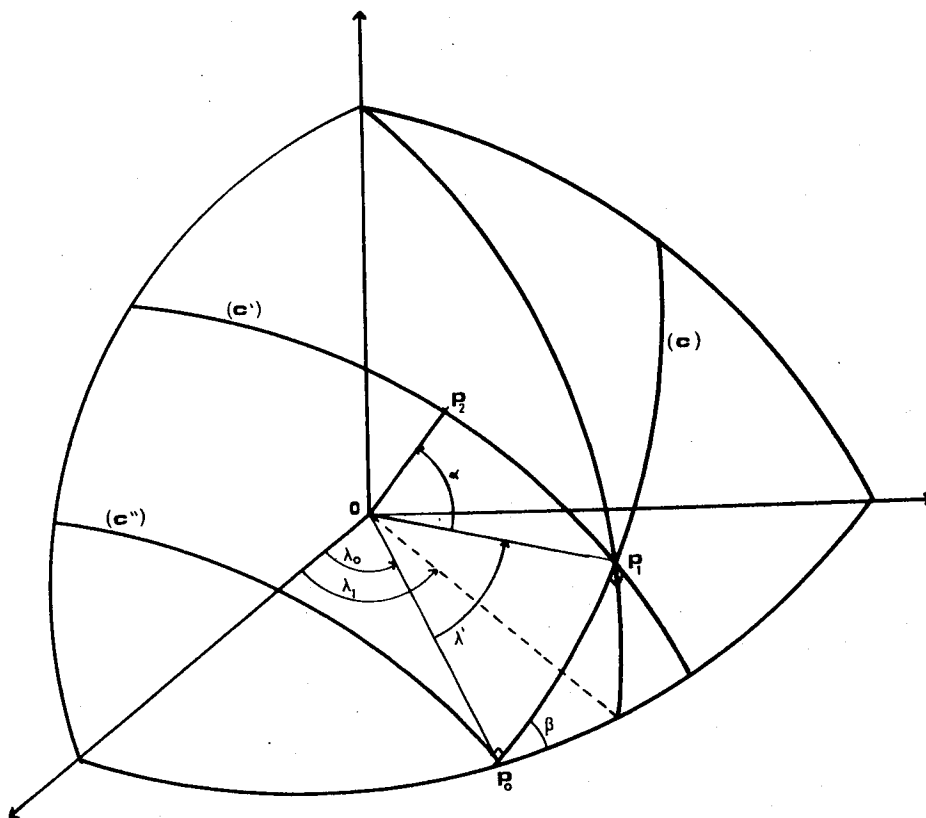


fig. 5.3 Géométrie des différents paramètres par rapport au satellite et à la terre.

Le cercle (C) a pour équation :

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \operatorname{tg} \beta \sin(\lambda_1 - \lambda_0) \quad (5.3)$$

où β est l'inclinaison du satellite, λ_0 est la longitude du noeud ascendant fictif, P_0 , correspondant à P_1 (on parle de fictif et d'instantané car la terre tourne et donc la trajectoire du satellite au sol n'est pas un grand cercle).

$$\lambda_0 = \lambda_1 - \operatorname{Arcsin}(\operatorname{tg} \varphi_1 / \operatorname{tg} \beta) \quad (5.4)$$

$$\sin(\lambda_1 - \lambda_0) = \operatorname{tg} \varphi_1 / \operatorname{tg} \beta \quad (5.5)$$

si λ' est l'arc du cercle (C) compris entre P_1 et le noeud P_0 , alors :

$$\sin \lambda' = \sin \varphi_1 \sin \beta + \cos \varphi_1 \cos \beta \sin(\lambda_1 - \lambda_0) \quad (5.6)$$

$$\cos \lambda' = \cos \varphi_1 \cos(\lambda_1 - \lambda_0) \quad (5.7)$$

$$\sin \lambda' = \sin \varphi_1 / \sin \beta \quad (5.8)$$

Soit le point P_2 , point d'une ligne de l'image, situé sur (C'), perpendiculaire à (C) en P_1 . (C') est une ligne d'image. On a alors :

$$\sin \varphi_2 \sin \beta + \cos \varphi_2 \cos \beta \sin(\lambda_2 - \lambda_0) = \sin \lambda' \cos \alpha \quad (5.9)$$

$$\cos \varphi_2 \cos(\lambda_2 - \lambda_0) = \cos \lambda' \cos \alpha \quad (5.10)$$

$$\sin \varphi_2 \cos \beta - \cos \varphi_2 \sin \beta \sin(\lambda_2 - \lambda_0) = \sin \alpha \quad (5.11)$$

α étant l'arc de cercle (C') entre P_1 et P_2 , calculé positivement quand la latitude de P_2 est supérieure à celle de P_1 . Les équations (5.9), (5.10) et (5.11) obtenues en définissant le point P_2 par rapport à un nouveau système qui admettrait (C) comme parallèle de référence, ces deux cercles se coupant à l'équateur. Dans ce système les coordonnées de P_2 sont

(λ', α) , d'après (5.9), (5.10) et (5.11) on obtient :

$$\sin\varphi_2 \sin\beta + \cos\varphi_2 \sin(\lambda_2 - \lambda_0) \cos\beta = \cos\alpha \sin\lambda' \quad (5.12)$$

$$\sin\varphi_2 \cos\beta - \cos\varphi_2 \sin(\lambda_2 - \lambda_0) \sin\beta = \sin\alpha \quad (5.13)$$

Soit en posant :

$$x = \sin\varphi_2$$

$$y = \cos\varphi_2 \sin(\lambda_2 - \lambda_0)$$

$$[x, y] \begin{bmatrix} \sin\beta & \cos\beta \\ \cos\beta & -\sin\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\alpha \sin\lambda' \\ \sin\alpha \end{bmatrix} \quad (5.14)$$

D'où :

$$\sin\varphi_2 = \sin\alpha \cos\beta = \cos\alpha \sin\varphi_1$$

$$\sin(\lambda_2 - \lambda_0) = [-\sin\alpha \sin\beta + (\cos\alpha \sin\varphi_1 / \operatorname{tg}\beta)] / \cos\varphi_2 \quad (5.15)$$

$$\text{Or } \operatorname{tg}\varphi_1 = \operatorname{tg}\beta \sin(\lambda_1 - \lambda_0)$$

D'où :

$$\sin\varphi_2 = \sin\alpha \cos\beta + \cos\alpha \sin\varphi_1 \quad (5.16)$$

$$\sin(\lambda_2 - \lambda_0) = (1/\cos\varphi_2) [-\sin\alpha \sin\beta + \cos\alpha \cos\varphi_1 \sin(\lambda_1 - \lambda_0)] \quad (5.17)$$

Afin de déterminer la correspondance coordonnées image et coordonnées géographiques, on suppose donnée l'inclinaison β , la longitude du noeud λ_0 ainsi que le temps écoulé Δt entre le survol de ce noeud et le survol du point P_1 , point sous satellite. On veut connaître les coordonnées géographiques λ_2 et φ_2 de P_2 qui est sur la ligne d'image passant par P_1 .

Il faut tout d'abord calculer les coordonnées du point P_1 . Si T désigne la durée d'une révolution :

$$\lambda' = 2\pi \Delta t / T$$

puis on peut calculer φ_1 et λ_1 :

$$\varphi_1 = \text{Arcsin}(\sin \lambda' \sin \beta) \quad (5.18)$$

$$\lambda_1 = \lambda_0 + \text{Arcsin}(\text{tg} \varphi_1 / \text{tg} \beta) \quad (5.19)$$

Il s'agit là du point P_1 fictif (terre immobile). Or la terre a tourné d'un angle égal à :

$$2\pi \Delta t / 86400 \quad (\Delta t \text{ exprimé en secondes})$$

Il faut donc retrancher à λ_1 cette quantité :

$$\lambda_1 = \lambda_0 + \text{Arcsin}(\text{tg} \varphi_1 / \text{tg} \beta) - 2\pi \Delta t / 86400 \quad (5.20)$$

pour obtenir les coordonnées du vrai point P_1 .

S'il s'agit d'une orbite descendante, on ajoute 180° à λ_1 . Connaissant le nombre de colonnes entre P_1 et P_2 ainsi que l'incrément d'angle du capteur, on peut calculer l'angle correspondant.

$$\varphi_2 = \text{Arcsin}[\sin \alpha \cos \beta + \cos \alpha \sin \varphi_1] \quad (5.21)$$

$$\lambda_2 = \lambda_0 + \text{Arcos}[(1/\cos \varphi_2)(-\sin \alpha \sin \beta + \cos \alpha \cos \varphi_1 \sin(\lambda_1 - \lambda_0))] \quad (5.22)$$

Toutefois, cette méthode de rectification n'était pas aisée à mettre en oeuvre. En effet, elle nécessite de gros moyens de calcul et la connaissance de nombreux paramètres. C'est pourquoi une méthode de rectification géométrique par estimation statistique a été mise au point. Elle n'utilise aucun paramètre d'orbite du satellite et ne requiert que peu de temps de calcul.

5.3 Mise en coincidence géométrique des images par estimation statistique avec prise d'amers

On pointe sur la carte de référence, puis sur l'image, quelques amers dont on récupère les coordonnées relatives dans chaque repère. Puis, en utilisant une méthode d'estimation statistique quelconque, on ajuste un modèle (par exemple, polynômial) sur ces listes de coordonnées, modèle permettant de passer du repère de l'image à celui de la carte. Ce modèle est ensuite appliqué à chaque point de l'image.

Cette méthode est simple, et ne demande pas de gros moyens de calcul. Elle nécessite cependant un système de prise d'amers, et surtout il faut que l'image comporte un nombre suffisant d'amers, ce qui n'est pas le cas en haute mer. La précision de localisation par cette méthode est excellente, et l'écart-type résiduel est souvent inférieur au demi-pixel. C'est cette dernière méthode qui est employée.

La rectification de l'image source peut se faire par rapport à :

- un fond de carte sur tablette, comme des cartes topographiques IGN à une échelle donnée,
- une image satellitaire ou numérisée. L'affichage sur écran se fait alternativement pour l'image source et l'image référence. Un même amer est pointé sur chaque image et la matrice de corrélation entre les deux voisinages des amers est calculée puis affichée. On a alors le choix entre garder les coordonnées initiales de l'image source ou bien adopter celles estimées par la technique d'assistance au pointage décrite ci-dessous.

5.3.1 Corrélation

Lors de la rectification image/image, après chaque prise d'amer de l'image source et de l'image référence, le programme offre une possibilité d'assistance à la détermination du meilleur amer référence au voisinage de celui pointé, par examen de similitude des voisinages des amers référence

et source. On définit un carré C dans l'image source centré au point amer source et un carré R dans l'image référence centré au point amer référence (pour notre usage C fait 13 pixels de côté et R, 7 pixels). On cherche ensuite la position de R dans C qui offre le maximum de similitude entre R et la portion de C recouverte par R : C' (figure 5.4).

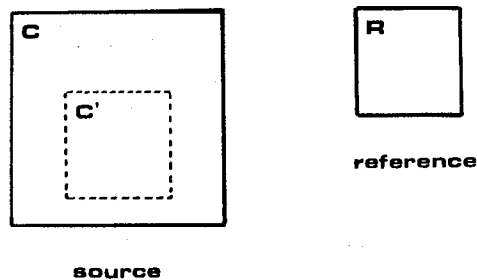


fig. 5.4 Découpage et superposition des carrés.

Le souci majeur pour la réalisation de ce logiciel a été un souci de rapidité de temps de calcul. Plusieurs démarches ont été testées afin de concilier fiabilité du résultat et célérité du calcul.

Coefficient de Pearson

Une des mesures de similarité les plus répandues, exprimant la liaison entre objets, basée sur deux variables mesurées C' et R sur chaque objet est le coefficient linéaire de Pearson $r_1(C', R)$.

La démarche usuelle est de calculer la variance de R, $\text{var}(R)$, la covariance de R et de C', $\text{cov}(R, C')$, la variance de C', $\text{var}(C')$, et on calcule ainsi le coefficient de corrélation linéaire de Pearson r_1 :

$$r_1(C', R) = \frac{\text{cov}(R, C')}{\sqrt{\text{var}(C') \cdot \text{var}(R)}}$$

Ce coefficient est calculé pour chaque position possible de R dans C. On obtient ainsi une matrice de corrélation et la position du maximum donnera la position de R dans C qui offre le plus de similitude.

Cette démarche offre le désavantage d'être relativement longue car les calculs se font en flottant et le nombre d'opérations est assez important.

Afin de diminuer le temps de calcul, nous avons imaginé de ne calculer la variance de C' une fois seulement, en faisant l'hypothèse : $\text{var}(C') = \text{var}(C) \forall C'$. D'où le coefficient de corrélation r_2 :

$$r_2(C', R) = \frac{\text{cov}(R, C')}{\sqrt{\text{var}(C) \cdot \text{var}(R)}}$$

Calcul de la médiane et seuillage

La démarche la plus rapide mais peut-être pas la plus fiable est celle qui consiste à transformer C en une image binaire. La valeur 0 est attribuée à tous les points dont la valeur est inférieure à un certain seuil et la valeur 1 aux autres. Ces valeurs sont rangées dans un tableau T_C . Le seuil peut être défini de manière diverse et nous l'avons ici posé comme égal à la médiane de l'histogramme de C .

On procède de même pour R et on range les valeurs dans T_R . On suppose que la médiane de C' est égale à la médiane de C et en chaque position C' la somme suivante est effectuée :

$$S = T_{C'} \text{ XOR } T_R$$

La table de vérité de XOR (ou exclusif) est la suivante :

X	Y	X XOR Y
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Le minimum de S , S' , définit la position offrant la plus grande similitude entre C' et R .

Soit S_R la surface du carré R . Un nouveau coefficient de corrélation r_3 est donné par :

$$r_3 = (S_R - S') / S_R$$

qui jauge la similitude.

Cette approche offre un temps d'exécution faible puisqu'il n'y a aucun calcul en flottant (l'histogramme se calcule en entier étant donné le faible nombre de points) et seules des opérations logiques et additions sont effectuées.

Il est également possible de recalculer à chaque position C' l'histogramme et la médiane de C' , c'est-à-dire de transformer C' en image binaire et non plus C . Puis on procède de même pour obtenir r_4 . Cette démarche est donc ainsi un peu plus longue en temps de calcul.

A la suite de nombreux essais, nous considérons dans le strict cadre de notre étude que pour les coefficients r_1 et r_2 (compris entre 0 et 1) 0,7 constitue une valeur limite. Les coefficients supérieurs à ce seuil dénotent une bonne similitude.

Pour les coefficients r_3 et r_4 , ces modèles de corrélation n'ont pas été suffisamment testés et il n'a pas été possible d'évaluer un tel seuil de rejet.

La conclusion sur ces différents coefficients de corrélation est que le coefficient le plus fiable est r_1 . Il s'adapte à tous les types d'images (images satellitaires et polygones) mais r_2 offre également de bons résultats et permet un gain de temps pour le calcul de la corrélation. Par contre r_3 et r_4 ne peuvent pas être utilisés sur des polygones. Toutefois ils sont relativement cohérents pour les images satellitaires et plus généralement pour toutes les images offrant peu de zones homogènes. En fonction de ces résultats c'est r_2 qui a été adopté.

5.3.2 Calcul du modèle et rectification

Une fois le nombre suffisant d'amers acquis (il en faut au minimum 3 pour le modèle d'ordre 1 et 6 pour le modèle d'ordre 2) le modèle est estimé à l'aide de la méthode des moindres carrés. On obtient ainsi des coefficients, 3 pour le modèle linéaire (ordre 1), 6 pour le modèle carré (ordre 2) en ligne et en colonne, ainsi que les résidus du modèle (écart de chaque point par rapport à la courbe). Le programme écrit est interactif, c'est-à-dire qu'on peut visualiser les coordonnées des amers et leurs résidus, et ainsi ôter des points dont l'écart au modèle est trop important (l'idéal est que les résidus soient inférieurs, en valeur absolue, à 0.5, c'est-à-dire au demi-pixel), rajouter de nouveaux amers et refaire une estimation du modèle.

Puis le modèle est appliqué à l'image à rectifier.

CHAPITRE 6

Filtrage

Le filtrage est utilisé afin d'éliminer le bruit affectant les images introduit par l'opération de correction atmosphérique ainsi que certaines échelles du mouvement (phénomène d'aliasing).

Le bruit a ici deux origines. Il est dû d'une part au bruit instrumental et d'autre part l'opération de correction atmosphérique introduit également un bruit blanc.

6.1 Le bruit instrumental

Le bruit des mesures satellitaires peut être estimé par la fonction de structure ou variogramme comme le montre la discussion suivante.

Soit une fonction aléatoire $y(x)$ à accroissements stationnaires. Pour tout accroissement, h , la différence $y(x+h) - y(x)$ admet alors une espérance mathématique et une variance indépendante du point d'appui. Le demi-variogramme $D(h)$ est donné par :

$$D(h) = 1/2 E[(y(x+h) - y(x))^2] \quad (6.1)$$

Lors des estimations, on ne connaît pas la valeur vraie $y(x)$ mais seulement une mesure $y^*(x)$, entachée d'une erreur de mesure stationnaire $e(x)$:

$$y^*(x) = y(x) + e(x) \quad (6.2)$$

Le demi-variogramme $D(h)$ devient :

$$\begin{aligned} D^*(h) &= 1/2 E[(y^*(x+h) - y^*(x))^2] \\ &= D(h) + D_e(h) + E[(y(x+h) - y(x))(e(x+h) - e(x))] \end{aligned} \quad (6.3)$$

Si on suppose l'erreur de mesure indépendante de la valeur vraie, le terme croisé se transforme en produit des espérances et s'annule, car e étant stationnaire, l'espérance de ses accroissements est nulle.

Si on suppose de plus que l'erreur est stationnaire et sans corrélation spatiale (bruit blanc) :

$$E[e(x)] = E[e(x+h)] = \bar{e} \quad (6.4)$$

$$\begin{aligned} D_e(h) &= 1/2 E[(e(x+h) - e(x))^2] \\ &= E[e(x)^2] - \bar{e}^2 = \text{var}[e(x)] = C \end{aligned} \quad (6.5)$$

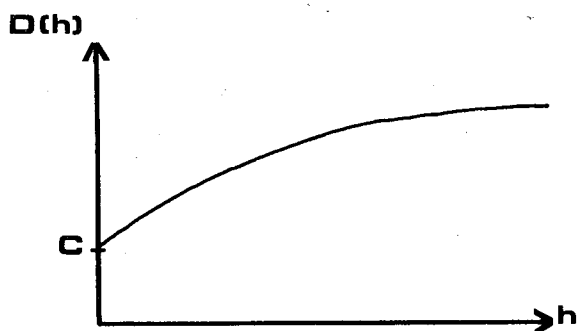
d'où :

$$D^*(h) = D(h) + C \quad (6.6)$$

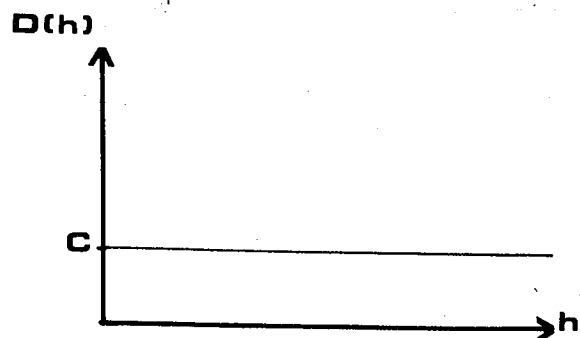
C'est la variance de l'erreur de mesure qui se répercute sur la fonction de structure comme une constante de pépité additionnelle. C'est la schématisation de toutes les structures de portée plus petite vis-à-vis de l'échelle d'observation (figure 6.1).

En étudiant le comportement à l'origine de la fonction de structure, il est possible d'évaluer le bruit des mesures. Il suffit pour cela de tracer pour chacun des canaux et capteurs une série de variogrammes et d'estimer la discontinuité à l'origine quand l'extrapolation est possible ou prendre la première valeur d'une série de dix points, que l'on considère comme une estimation fiable de la discontinuité à l'origine.

On observe ainsi que le bruit de mesure des images AVHRR dans les canaux C4 et C5 est extrêmement faible (figure 6.2). Heyraud (1985) a montré que le bruit est blanc et que son écart-type est de l'ordre de 0,05°C, donc inférieur à la résolution thermique du capteur qui est de 0,09°C. Par conséquent ce bruit est négligeable et disparaîtra dans le filtrage des structures.



Effet de pépité, la fonction de structure est discontinue à l'origine.



Effet de pépité à l'état pur, il caractérise le bruit blanc, c'est-à-dire la décorrélation spatiale des mesures.

fig. 6.1 Effets de pépité.

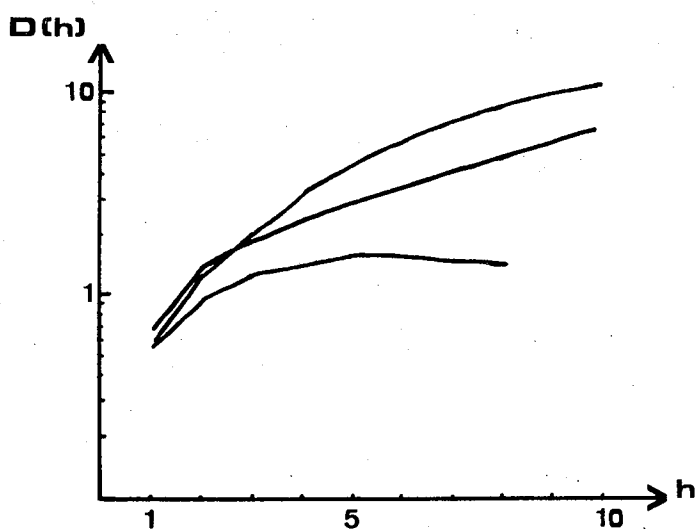


fig. 6.2 Exemple de variogramme pour le canal C5 (Heyraud, 1985).

6.2 Bruit induit par la correction atmosphérique

Il s'agit d'évaluer le bruit induit par la combinaison linéaire des canaux C4 et C5. Pour simplifier l'écriture, les températures données par les canaux C4 et C5 seront notées respectivement T_1 et T_2 . Toutefois nous généralisons tout de suite la discussion en supposant n canaux décrits par l'indice courant k et T_k .

La température réelle de la mer est donnée par :

$$T = a_0 + \sum_{k=1}^n a_k T_k \quad (6.7)$$

où les T_k sont les températures radiométriques des canaux k .

Soient T_{mk} les températures observées dans les canaux k pour l'échantillon m et T_m la température résultant de la combinaison linéaire des T_{mk} :

$$T_m = a_0 + \sum_{k=1}^n a_k T_{mk} \quad (6.8)$$

T_m est donc une estimation de la vraie température T . Cette dernière est égale à la moyenne des T_m puisque les algorithmes type (6.7) ont été conçus pour donner un biais nul :

$$E(T_m) = T \quad (m = 1, \dots, N) \quad (6.9)$$

On a donc :

$$T = E(T_m) = E\left(a_0 + \sum_{k=1}^n a_k T_{mk}\right)$$

$$T = a_0 + \sum_{k=1}^n a_k E(T_{mk}) \quad (6.10)$$

La variance de T_m est :

$$\begin{aligned} \text{var}(T_m) &= E[(T - T_m)^2] \\ &= E[(a_0 + \sum_{f=1}^n a_f E(T_{mf}) - a_0 - \sum_{g=1}^n a_g T_{mg})^2] \\ &= E[(a_1 E(T_{m1}) + a_2 E(T_{m2}) + \dots - a_1 T_{m1} - a_2 T_{m2} - \dots)^2] \\ &= \sum_{k=1}^n a_k^2 \text{var}(T_{mk}) - \sum_{\substack{k, f=1 \\ k \neq f}}^n a_k a_f \text{covar}(T_{mk}, T_{mf}) \end{aligned}$$

Il n'y a que deux canaux (C4 et C5), d'où :

$$\text{var}(T_m) = a_1^2 \text{var}(T_1) + a_2^2 \text{var}(T_2) - 2a_1 a_2 \text{covar}(T_1, T_2) \quad (6.11)$$

Les bruits des canaux C4 et C5 sont blancs et décorrélés, d'où :

$$\text{var}(T_m) = a_1^2 \text{var}(T_1) + a_2^2 \text{var}(T_2) \quad (6.12)$$

Si les coefficients a_1 et a_2 sont égaux à 3 et à -2 et sachant que l'écart-type du bruit des canaux C4 et C5 est égal à 0,05°C, alors l'écart-type du bruit introduit par la correction atmosphérique sera égal à 0,18°C. Etant donnée la résolution thermique du capteur (0,09°C), ce bruit est non négligeable et il faudra l'éliminer.

6.3 Détermination d'échelle critique et élimination des échelles inférieures

On dispose d'un échantillonnage dans l'espace (résolution au sol du capteur) et d'un échantillonnage dans le temps (couple d'images acquises à une période T d'intervalle). Le théorème de Nyquist s'applique à ces deux espaces, d'où deux contraintes déterminant les plus petites longueurs d'onde L_N et périodes T_N observables.

L'échantillonnage dans l'espace étant de 1 km, la première contrainte indique que les longueurs d'onde inférieures à 2 km ne peuvent pas être déterminées.

A T_N correspond une longueur d'onde L_N en supposant une vitesse de déplacement constante v . Alors $L_N = vT_N$ et la seconde contrainte implique que les mouvements dont le déplacement est inférieur à L_N ne peuvent pas être examinés. En supposant un pas d'échantillonnage de 24h ($T_N = 48h$) et une vitesse de 0,5 m/s, $L_N = 86,4$ km (figure 6.3).

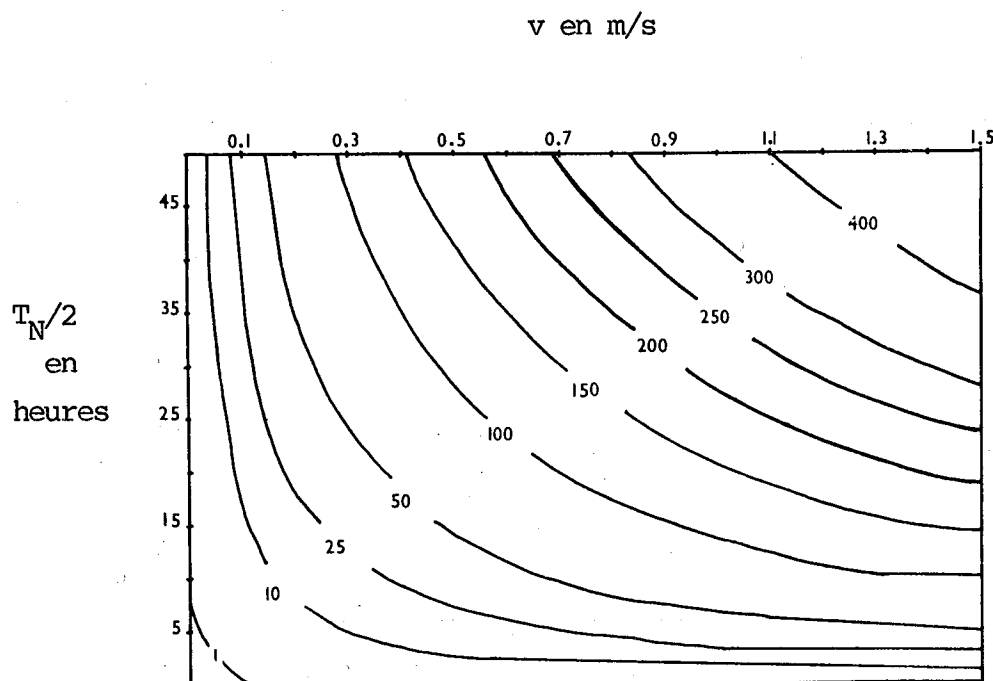


fig. 6.3 Abaque des longueurs d'onde L_N en m.

6.4 Les différents filtres

Il faut éliminer les échelles inférieures ainsi que le bruit introduit par la correction atmosphérique. Pour cela le choix du filtre a été conditionné par l'étude des filtres suivants.

Le filtrage par transformée de Fourier n'a pas été utilisé car cela supposait la non-utilisation de masques (côtes, nuages). Le programme réalisé (procédant par fenêtre glissante) donne le choix entre plusieurs filtres (2 linéaires et 3 non-linéaires).

Moyenne arithmétique : on attribue au point courant la moyenne arithmétique des points situés à l'intérieur de la fenêtre.

Filtre à coefficients choisis : il s'agit ici de faire la somme des valeurs des points du filtre, pondérées par des coefficients préalablement choisis. Le résultat x est ensuite multiplié par A et augmenté de B pour obtenir y , $y = Ax + B$, A et B étant choisis par l'utilisateur (dilatation et translation).

Exemple : A peut être l'inverse de la somme des coefficients, si cette somme n'est pas nulle (cas général du lissage avec $B = 0$). Dans le cas de filtres de type gradient ou laplacien, on peut choisir B égal à 128 (translation de l'origine) et A sera un facteur d'élargissement de l'intervalle des valeurs résultat. Si $x = 2$, cela se traduira avec $A = 5$ et $B = 128$ par un compte numérique de 138 dans l'image résolue.

Accessoirement de ce type de filtre ont été dérivés trois autres filtres (gradient horizontal ou vertical, laplacien) qui n'offrent pas d'intérêt pour cette étude.

Filtre médian : pour chaque position du filtre on calcule la médiane de l'histogramme (cette médiane divise l'histogramme en deux parties d'aires égales) des points situés à l'intérieur du filtre et on attribue ensuite cette médiane au point courant.

Filtre modal (dit majoritaire) : pour chaque position du filtre on calcule le mode de l'histogramme du filtre, c'est-à-dire la valeur la plus

fréquente de l'histogramme et on attribue ce mode au point courant.

Filtre conditionnel à coefficients choisis conditionné par le gradient local : il se présente comme le lissage à coefficients choisis. Toutefois seuls sont pris en compte les points dont les écarts des valeurs par rapport au point courant sont inférieurs ou égaux à un seuil choisi par l'utilisateur.

Le projet requiert un filtre éliminant certaines échelles et respectant les forts gradients. En regard de ces critères les filtres médian ou modal sont les mieux adaptés à notre problème.

En effet le filtrage par moyenne arithmétique (ou à coefficients choisis) lisserait les petites structures mais aussi les forts gradients. Le filtrage conditionnel à coefficients choisis conditionné par le gradient local respecterait les forts gradients mais également les structures de petite échelle à fort gradient que l'on désire éliminer.

Etant donné que le filtre médian n'est pas linéaire, la succession de deux filtres médians à faible base donne des résultats différents de ceux obtenus par un filtre de largeur double (surface quadruple), contrairement à un filtre de type arithmétique. Deux petits filtres médians respecteront les gradients et les petites structures, un large éliminera les petites structures et une partie des fronts.

Pour illustrer ces différents types de filtres nous avons traité une thermographie prise dans l'infrarouge, provenant du satellite NOAA-7. Elle représente le Gulf Stream et est datée du 23 avril 1981 (figure 6.4).

Le filtre utilisé est un filtre carré de dimension cinq pixels. Les filtres suivants ont été testés :

- moyenne arithmétique (figure 6.5),
- médian (figure 6.6),
- modal (figure 6.7),
- à coefficients choisis conditionné par la variance locale (figure 6.8),
les coefficients sont tous égaux à 1 et le seuil choisi est de 10.



fig. 6.4 Thermographie du Gulf Stream provenant du satellite NOAA-7 et datée du 23 avril 1982. Les teintes claires de l'image correspondent au domaine terrestre.



fig. 6.5 Filtrage par moyenne arithmétique. On peut noter la dégradation de la côte et la disparition des petites structures ainsi qu'une impression de flou.



fig. 6.6 Filtrage médian. La côte a été lissée mais les contours restent nets (l'impression de flou a disparu). Les petites structures ont disparu.

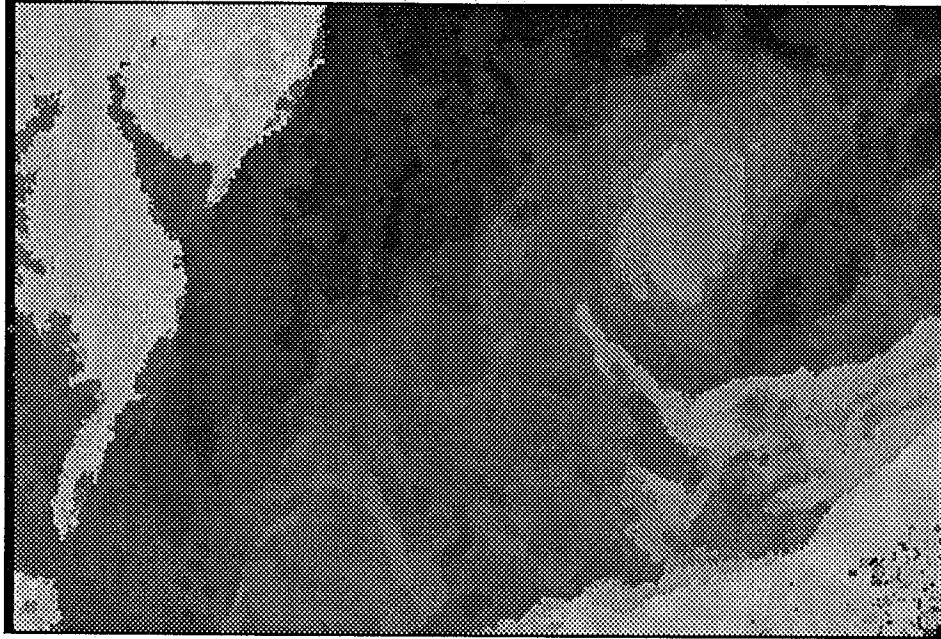


fig. 6.7 Filtrage modal. Les petites structures ont disparu mais on peut constater que la côte n'a pas été lissée.

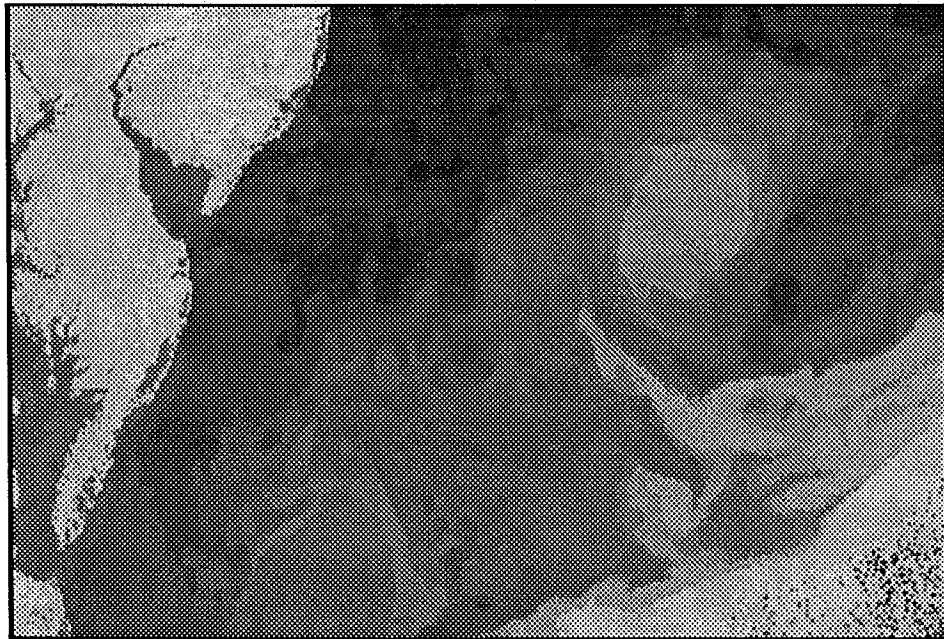


fig. 6.8 Filtrage à coefficients choisis conditionné par la variance locale. Les coefficients sont égaux à 1 et le seuil est de 10. On peut noter que la côte est respectée et que certaines petites structures ont disparu.

CHAPITRE 7

Moyenne d'images, dérivée temporelle

Et cartographie des isophotes

On possède deux images codées en compte numérique (CN) de 0 à 255 (nombres entiers). Chaque CN i peut être transformé en température T par une relation de type affine :

$$T = i * a + b \quad (7.1)$$

Ces images ayant été rectifiées géométriquement de manière à être superposables point par point, elles sont donc comparables.

7.1 Moyenne d'images

Le gradient normal à l'isophote est estimé sur l'image moyenne ce qui équivaut à la moyenne des gradients. Le schéma numérique est donc centré dans le temps.

La moyenne temporelle d'images consiste à faire en chaque point la moyenne des comptes numériques.

Cependant trois problèmes se posent.

- L'obtention des erreurs d'arrondi dues au calcul numérique de la moyenne. Elles sont minimisées en effectuant les opérations en mode réel, puis en arrondissant à l'entier le plus proche. Une précision de $a/2$ est ainsi perdue dans les résultats.
- Effet de cadre. Les images peuvent ne pas recouvrir exactement la même zone géographique. Il faut donc cadrer les images et les valeurs extérieures au cadre ne sont pas prises en compte. L'effet de cadre sera éliminé par l'utilisation d'un masque.
- Présence de nuages sur les images. Plutôt que de rejeter globalement les images présentant quelques nuages, il est préférable d'éliminer les zones nuageuses sur les deux images par l'utilisation d'un masque. Généralement un nuage est plus froid et plus brillant (plus réfléchissant) que la mer. Ces caractéristiques suffisent alors à le repérer si l'on dispose d'images prises dans le proche ou moyen infrarouge.

7.2 Dérivée temporelle d'images

Il s'agit de faire la différence des deux images point par point. Il faut de plus recentrer la différence par rapport à un compte numérique (128 par exemple), car les comptes numériques ne peuvent être négatifs, et dilater les différences pour obtenir une résolution "fictive".

7.3 Cartographie des isophotes

Il est nécessaire pour la réalisation de notre étude d'extraire les contours d'une image en tenant compte éventuellement d'un masque. Cette image des contours sert de support à la résolution numérique de l'équation de la chaleur (sous la forme $T_t + T_n \psi_s = Q$), point par point.

L'extraction de contours se fait généralement sous forme de liste de coordonnées. En traitant plusieurs isothermes à la fois, le fichier image peut n'être balayé qu'une seule fois. Les couples de coordonnées doivent être ensuite ordonnés en partant de la position géographique du lieu d'initialisation de la fonction de courant ψ puis en suivant l'isotherme.

Mais il est préférable pour notre problème d'obtenir une image des contours, ce qui est très simple et rapide, tandis qu'obtenir la liste des coordonnées est beaucoup plus fastidieux et long.

Il est seulement nécessaire pour cette étude de suivre les isothermes à travers le champ de température présenté par la thermographie.

Pour réaliser cette cartographie des contours la méthode employée est la suivante. L'image est parcourue ligne par ligne et de gauche à droite. Le point courant est comparé à son voisin de droite. Si la différence de leur valeur n'est pas nulle et si lui ou son voisin ne font pas partie du masque (on a donc deux zones différentes), le point de valeur supérieure est marqué. La comparaison est également faite pour le pixel courant et son voisin inférieur. Les points non marqués sont forcés à une valeur d'initialisation choisie à l'avance.

CHAPITRE 8

Interpolation

Des isophotes d'une image

A cette étape du traitement, la cartographie de l'image moyenne des températures est effectuée. L'interpolation de ces isothermes donnera une cartographie complète spatialement, c'est-à-dire que chaque point de l'image aura une valeur définie et appartiendra ainsi à une isotherme.

Pour cela deux méthodes différentes dans leurs principes ont été mises au point. Elles font toutes deux appel à une transformée en distance.

La première méthode que nous appellerons "interpolation point par point", est réalisée à partir de la cartographie des contours de l'image moyenne, puis par le calcul de l'image transformée en distance selon l'algorithme de Yokoi et al..

La deuxième méthode appelée "interpolation plage par plage" se fait à partir de la cartographie de l'image moyenne. Le calcul de la transformée en distance selon l'algorithme de Rosenfeld est réalisé en même temps que l'interpolation.

L'interpolation plage par plage est nettement plus rapide que l'interpolation point par point mais cette dernière offre l'avantage d'être beaucoup plus juste.

8.1 Transformée en distance

Le calcul de la transformée en distance se fait sur une image binaire. L'image originale est tout d'abord transformée en une nouvelle image où les isothermes sont symbolisées par des "0" quelles que soient leur valeur. Une opération concernant les voisins (4 ou 8 connexes) du point considéré définira la fonction de distance.

Soit une image binaire de I lignes et J colonnes, chaque point est référencé par la ligne courante i et la colonne courante j tels que :

$$1 \leq i \leq I \quad \text{et} \quad 1 \leq j \leq J$$

On veut construire une image transformée en distance, dans laquelle chaque élément aura une valeur entière, égale à sa distance du plus proche élément de l'ensemble des zéros. Les zéros restent inchangés car situés à

la distance zéro d'eux-mêmes.

Par une opération de voisinage sur l'image originale, il s'agit de définir une fonction concernant les 4 ou 8 voisins du point référencé (i,j) et de valeur $a_{i,j}$.

Cas des 4 connexes :

$$a_{i,j}^* = f_1(a_{i-1,j}, a_{i,j-1}, a_{i,j+1}, a_{i+1,j})$$

Cas des 8 connexes :

$$a_{i,j}^* = f_2(a_{i+m,j+k}) \quad \text{avec} \quad \begin{array}{l} m = -1, 0, 1 \\ k = -1, 0, 1 \\ m \text{ et } k \text{ non nuls simultanément} \end{array}$$

L'opération de voisinage va s'effectuer par une opération que Rosenfeld (1966) qualifie de séquentielle. On suppose que les points sont traités ligne par ligne et de gauche à droite. Ainsi dès qu'un point est traité, sa nouvelle valeur plutôt que la valeur originale est utilisée dans le traitement successif des points qui ont celui-ci pour voisin, d'où :

Cas des 4 connexes :

$$a_{i,j}^* = f_1(a_{i-1,j}^*, a_{i,j-1}^*, a_{i,j+1}^*, a_{i+1,j}^*)$$

Cas des 8 connexes :

$$a_{i,j}^* = f_2(a_{i-1,j-1}^*, a_{i-1,j}^*, a_{i-1,j+1}^*, a_{i,j-1}^*, a_{i,j+1}^*, a_{i+1,j-1}^*, a_{i+1,j}^*, a_{i+1,j+1}^*)$$

L'opération séquentielle s'oppose à une opération que Rosenfeld (1966) appelle parallèle où, lors de la transformation de l'image originale, la fonction f_i agit sur les points originaux de l'image, les

1	1	1	1	1	10	10	10	10	10	4	3	2	3	4
1	1	1	1	1	10	10	10	10	10	3	2	1	2	3
1	1	0	1	1	10	10	0	1	2	2	1	0	1	2
1	1	1	1	1	10	10	1	2	3	3	2	1	2	3
1	1	1	1	1	10	10	2	3	4	4	3	2	3	4
Image binaire					Fonction d_1					fonction d_2				

fig. 8.1 Exemple de calcul de transformée en distance pour le cas des 4 connexes.

8.1.3 Cas des 8 connexes, algorithme de Yokoi et al. (1981)

Les 8 connexes du point référencé (i, j) sont les points suivants :

$i-1, j-1$	$i-1, j$	$i-1, j+1$
$i, j-1$	i, j	$i, j+1$
$i+1, j-1$	$i+1, j$	$i+1, j+1$

Il faut noter que cet algorithme traite différemment les points situés à une distance paire ou impaire, en diagonale, de l'ensemble des zéros.

Pour la réalisation de cette transformation en distance il faut décomposer la fonction f_2 en 4 fonctions d_1 , d_2 , d_3 et d_4 qui sont toutes des opérations séquentielles effectuées selon les séquences de la figure (8.2). La fonction d_1 s'effectue de la ligne 1 à la ligne I et de la colonne 1 à la colonne J, d_2 s'effectue de la ligne I à la ligne 1 et de la colonne J à la colonne 1, d_3 s'effectue de la ligne 1 à la ligne I et de la colonne J à la colonne 1, d_4 s'effectue de la ligne I à la ligne 1 et de la colonne 1 à la colonne J.

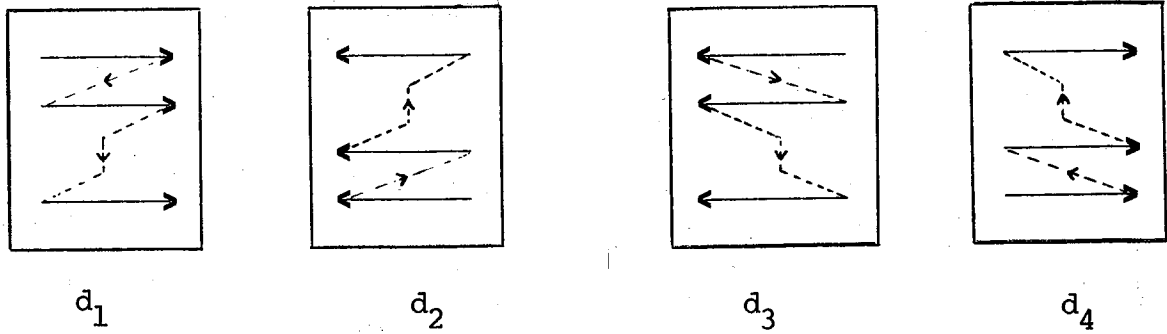


fig. 8.2 Séquences des opérations pour le calcul de la transformée en distance dans le cas des 8 connexes.

La première transformation se fait par la fonction d_0 définie comme suit :

$$d_0(a_{i,j}) = \begin{cases} d_{\max} & \text{si } a_{i,j} = 1 \\ 0 & \text{si } a_{i,j} = 0 \end{cases}$$

d_{\max} est la plus grande distance possible entre deux points de l'image, et est posée égale à $2 \max(I, J)$.

d_1 , d_2 , d_3 et d_4 sont définies comme suit :

$$d_1(a_{i,j}) = \min(d_0(a_{i,j}), a_{i,j} + d_1(a_{i-1,j}), a_{i,j} + d_1(a_{i,j-1}), a_{i,j} + d_1'(a_{i-1,j-1}))$$

$$d_2(a_{i,j}) = \min(d_1(a_{i,j}), a_{i,j} + d_2(a_{i,j+1}), a_{i,j} + d_2(a_{i+1,j}), a_{i,j} + d_2'(a_{i+1,j+1}))$$

$$d_3(a_{i,j}) = \min(d_2(a_{i,j}), a_{i,j} + d_3(a_{i-1,j}), a_{i,j} + d_3(a_{i,j+1}), a_{i,j} + d_3'(a_{i-1,j+1}))$$

$$d_4(a_{i,j}) = \min(d_3(a_{i,j}), a_{i,j} + d_4(a_{i,j-1}), a_{i,j} + d_4(a_{i+1,j}), a_{i,j} + d_4'(a_{i+1,j-1}))$$

Les fonctions d_i' sont définies ainsi :

$$d_i' = \begin{cases} d_i & \text{si } d_i \text{ est impaire} \\ d_{\max} & \text{si } d_i \text{ est paire} \end{cases}$$

Dans les cas particuliers où les indices prennent les valeurs :

$$i - 1 < 1, \quad i + 1 > I$$

$$j - 1 < 1, \quad j + 1 > J$$

cas des premières, dernières lignes et premières, dernières colonnes, la valeur des distances d_i correspondantes est forcée à d_{\max} . Ainsi tout élément (i, j) est à une distance inférieure ou égale à d_{\max} (figure 8.3).

10 10 10 10 10	3 2 2 3 4	3 2 2 3 4	3 2 2 2 3
10 10 10 10 10	2 2 1 2 3	2 2 1 2 3	2 2 1 2 2
10 10 0 1 2	2 1 0 1 2	2 1 0 1 2	2 1 0 1 2
10 10 1 2 2	3 2 1 2 2	2 2 1 2 2	2 2 1 2 2
10 10 2 2 3	4 3 2 2 3	3 2 2 2 3	3 2 2 2 3
d_1	d_2	d_3	d_4

fig. 8.3 Exemple de calcul de transformée en distance pour le cas des 8 connexes.

8.1.4 Précision des deux algorithmes

Au vu de ces résultats il apparaît que l'erreur la plus importante est celle commise sur la diagonale et diminue au fur et à mesure que l'on s'approche soit de l'horizontale soit de la verticale. Une comparaison avec la distance euclidienne va être effectuée afin d'estimer cette erreur.

Dans le cas des 4 connexes, sur la diagonale, les distances croissent régulièrement avec un pas de 2, une distance de 2 sur la diagonale correspond en fait à une distance euclidienne égale à $\sqrt{2}$. L'erreur e_R correspondant à la distance d_R de Rosenfeld est donc :

$$e_R = (2 - \sqrt{2}) / \sqrt{2} = 0,41$$

Dans le cas des 8 connexes le problème est plus complexe car les distances ne croissent pas régulièrement sur la diagonale. Soit d_e la distance euclidienne et d_y la distance donnée par l'algorithme de Yokoi et al. sur la diagonale. L'erreur e_y estimée à l'aide de quelques points donne un pourcentage d'erreur compris entre 1 et 6% alors que e_R est une erreur systématique de 41%. La figure (8.4) montre la différence entre toutes ces distances.

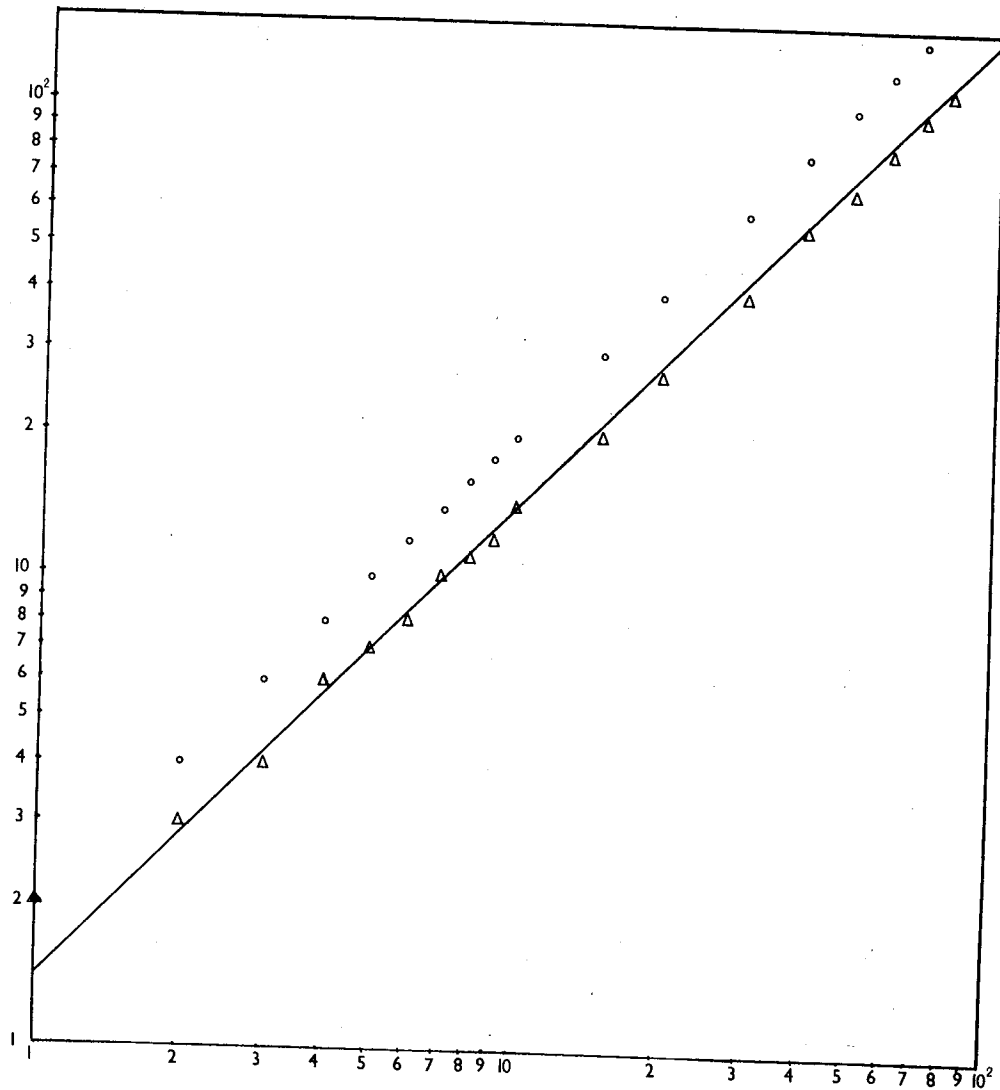


fig. 8.4 Les d_Y sont représentés par des triangles, les d_R par des ronds, le trait continu représente la distance euclidienne.

8.2 Interpolation point par point

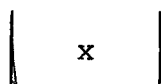
Afin de réaliser cette interpolation il faut tout d'abord calculer l'image transformée en distance, qui donne en chaque point la distance à l'isotherme la plus proche, puis calculer la valeur du point en fonction des isothermes l'entourant (moyenne pondérée).

A partir de l'image transformée en distance, le point est interpolé par rapport aux deux isothermes les plus proches.

La distance du point à la première isotherme étant donnée par l'image transformée en distance, il faut maintenant déterminer la position de la deuxième isotherme.

Pour cela une fenêtre est centrée sur le point considéré (les dimensions peuvent être choisies en fonction de la densité des isothermes) puis :

- la première isotherme est masquée,
- la transformée en distance est recalculée,
- la deuxième isotherme est recherchée,
- puis le chemin entre le point et la deuxième isotherme est parcouru afin de déterminer si la première isotherme s'y trouve, c'est-à-dire si le point est entre ou en dehors des isothermes trouvées.



point entre les isothermes



point en dehors des isothermes

Si le point est en dehors des isothermes, les opérations précédentes sont reprises, mais cette fois-ci en masquant la première et la deuxième isotherme et ceci un nombre fini de fois jusqu'à trouver le point entre deux isothermes. Si cela est impossible (sur les bords de l'image par exemple) le point est alors interpolé par rapport aux deux premières isothermes en considérant que le point est en dehors de celles-ci.

La valeur attribuée au point traité est donc fonction des distances de ce point aux isothermes et de la valeur de ces isothermes (figure 8.5).


```

0 0 0 0 30 0 0 0 0
0 0 0 0 30 0 0 0 0
0 0 0 0 30 0 0 0 50
0 0 0 30 30 0 0 50 50
0 0 30 30 0 0 0 50 0
0 30 30 0 0 0 0 50 0
0 30 0 0 0 0 50 50 0
30 0 0 0 50 50 50 0 0
30 0 0 0 50 0 0 0 0

```

Image originale, comprenant
deux isothermes (30 et 50)

```

4 3 2 1 0 1 2 3 4
4 3 2 1 0 1 2 3 4
3 2 2 1 0 1 2 3 4
2 2 1 0 0 1 2 3 4
2 1 0 0 1 2 2 3 4
1 0 0 1 2 2 3 4 4
1 0 1 2 2 3 4 4 5
0 1 2 2 3 4 4 5 6
0 1 2 3 4 4 5 6 6

```

Distances à l'isotherme 30

```

3 10 20 25 30 34 38 42 47
3 10 17 23 30 35 40 42 46
10 20 17 23 30 37 40 45 50
20 17 23 30 30 37 43 50 50
17 23 30 30 35 40 43 50 57
23 30 30 37 40 40 45 50 57
23 30 37 40 43 45 50 50 55
30 35 40 45 50 50 50 55 60
30 35 40 45 50 57 55 60 60

```

```

4 3 2 1 0 1 2 2 2
4 3 2 1 0 1 2 2 1
3 2 2 1 0 1 2 1 0
2 2 1 0 0 1 1 0 0
2 1 0 0 1 2 1 0 1
1 0 0 1 2 2 1 0 1
1 0 1 2 1 1 0 0 1
0 1 2 1 0 0 0 1 2
0 1 2 1 0 1 1 2 2

```

Image transformée en distance
à la plus proche isotherme
selon Yokoi et al.

```

7 6 6 5 4 4 3 2 2
7 6 5 4 4 3 2 2 1
6 6 5 4 3 2 2 1 0
6 5 4 4 3 2 1 0 0
5 4 4 3 3 2 1 0 1
4 4 3 2 2 2 1 0 1
4 3 2 2 1 1 0 0 1
4 3 2 1 0 0 0 1 2
4 3 2 1 0 1 1 2 2

```

Distances à l'isotherme 50

fig. 8.5 Interpolation point par point.

Soient V_1 et V_2 les valeurs respectivement, de la première et deuxième isotherme et D_1 la distance du point par rapport à l'isotherme i . Si le point est entre les isothermes trouvées, sa valeur sera :

$$V_1 + \frac{(V_2 - V_1) * D_1}{(D_1 + D_2)}$$

sinon :

$$V_1 + \frac{(V_1 - V_2) * D_1}{(D_2 - D_1)}$$

8.3 Interpolation plage par plage

L'image originale est l'image moyenne du couple des thermographies. Il s'agit donc d'interpoler les valeurs des différentes plages de température.

On calcule tout d'abord l'histogramme de l'image originale afin de ne pas interpoler les plages peu représentées (le seuil choisi est 1/1000 de la surface de l'image originale).

Le traitement de l'image se fait plage par plage et la plage de valeur la plus élevée n'est pas traitée.

Pour chaque plage l'image est parcourue deux fois, de la ligne 1 à la dernière ligne puis de la dernière ligne à la première.

Pour chaque point appartenant à la plage considérée on procède comme suit : on recherche la distance (D_{sup}) à la plage la plus proche de valeur supérieure (V_{sup}) et la distance (D_{inf}) à la plage la plus proche de valeur inférieure (l'algorithme de calcul de transformée en distance est celui de Rosenfeld, cas des 4 connexes).

Il sera toujours possible de trouver D_{sup} (car la plage de valeur la plus élevée n'est pas traitée) tandis que D_{inf} sera borné à une distance maximum (égale à la somme du nombre de lignes et de colonnes de l'image

originale) dans le cas du traitement de la plage de valeur la plus faible (figure 8.6).

Soit V_{cour} la valeur de la plage traitée, la valeur du point interpolé sera :

$$\frac{D_{\text{sup}}V_{\text{cour}} + D_{\text{inf}}V_{\text{sup}}}{D_{\text{sup}} + D_{\text{inf}}}$$

26	27	28	29	33	36	39	41	44
26	27	28	29	33	37	40	43	47
26	27	28	29	34	38	42	46	50
27	28	29	34	38	42	46	50	50
28	29	33	37	40	43	47	50	50
29	33	36	39	41	44	47	50	50
29	34	38	42	46	47	50	50	50
34	38	42	46	50	50	50	50	50
37	40	43	47	50	50	50	50	50

fig. 8.6 Interpolation plage par plage.

8.4 Comparaison des deux méthodes d'interpolation

L'interpolation point par point offre l'avantage d'être beaucoup plus juste, tous les paramètres qui peuvent influencer la valeur du point à interpoler sont pris en compte dans le calcul. Notons tout de même à la charge de cette méthode, que nous sommes limités, dans la recherche des isothermes les plus proches, par la taille de la fenêtre considérée (il faut prendre en compte les limitations imposées par la machine et le langage de programmation). Le temps d'exécution de cette méthode est très long, mais il peut varier fortement selon la machine utilisée et ne devenir en fait qu'un problème mineur.

L'avantage de la méthode d'interpolation plage par plage est son temps d'exécution relativement rapide. Toutefois, n'oublions pas que l'algorithme utilisé pour la transformée en distance est celui de Rosenfeld (cas des 4 connexes) où nous avons noté de fortes imprécisions quant à la valeur de la distance sur la diagonale (cf. § 8.1.4), ceci se répercute sur le calcul du point interpolé. De même, notons que la valeur de la plage inférieure n'est pas prise en compte dans le calcul. Cette méthode ne respecte pas le minimum relatif que peut offrir une plage de température entourée de deux plages de valeur supérieure (figure 8.7), les écarts rencontrés peuvent être importants. Ceci peut être rectifié en remplaçant les valeurs de bords de la plage par des valeurs inférieures à celle-ci, on obtiendra ainsi un minimum égal à la valeur de la plage initiale (figure 8.8). Toutefois cela demande un retraitement manuel de l'image qui n'est pas aisé à réaliser, ceci dû au fait de la grande complexité des images traitées.

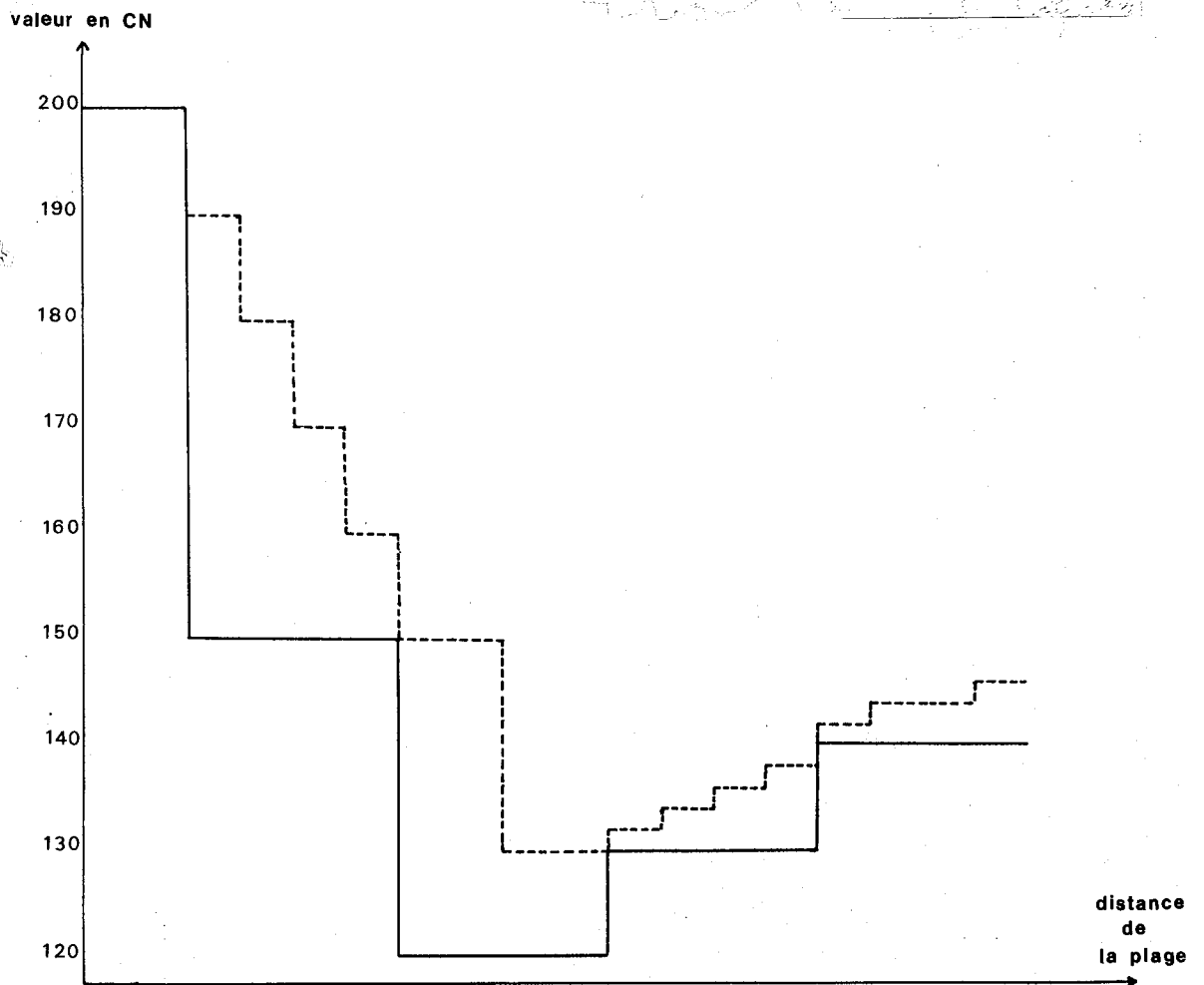


fig. 8.7 Exemple de profil de plages de température interpolées. Le trait plein représente la valeur initiale des plages, le pointillé la valeur interpolée. Notons que le minimum de valeur 120 n'est pas respecté.

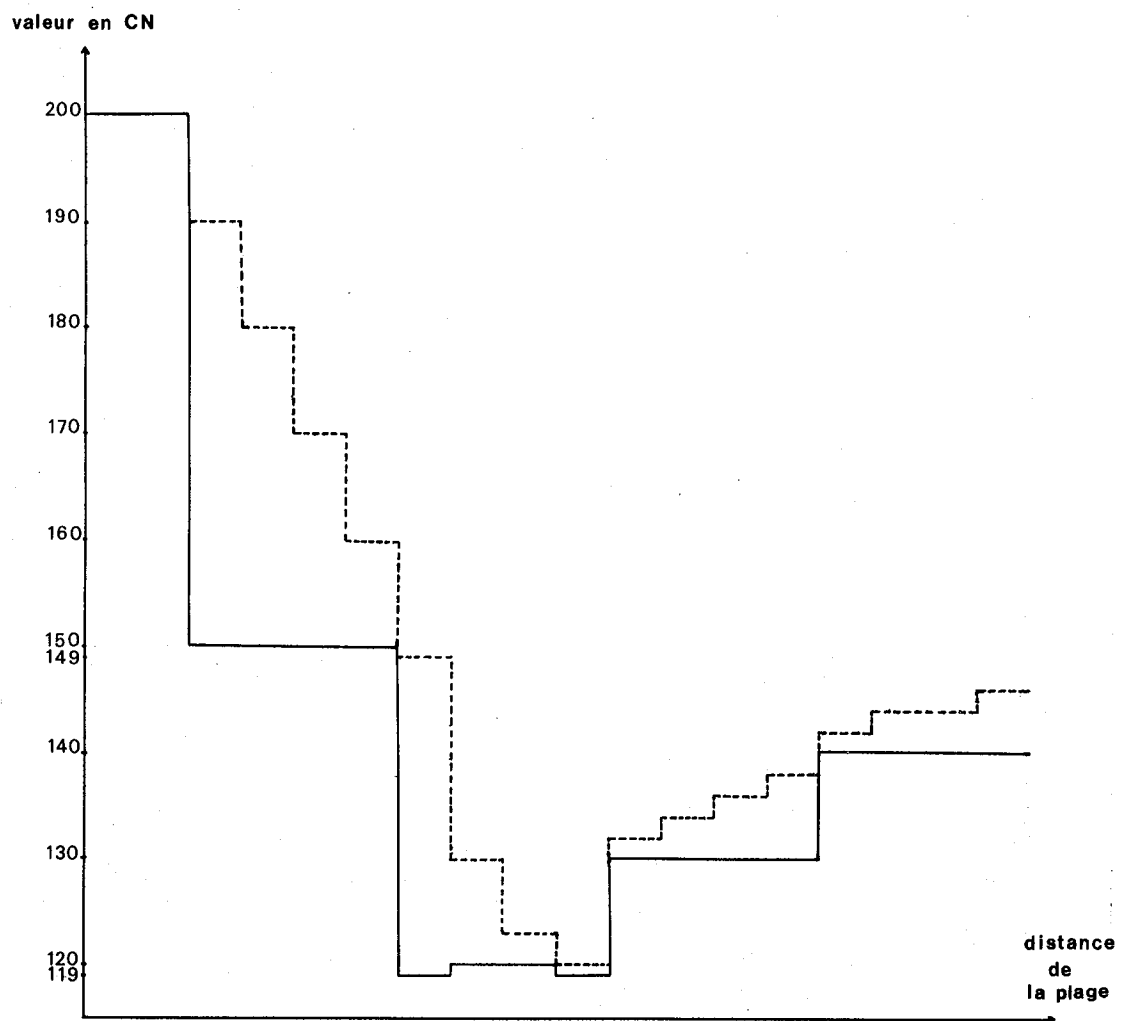


fig. 8.8 La plage 120 a été modifiée. Nous avons remplacé les valeurs extrêmes par la valeur 119 et nous avons ainsi un minimum à 120.

CHAPITRE 9

Calcul du gradient

Normal à l'isophote

La valeur algébrique du gradient thermique ($T_n = dT / dn$) est calculée à partir de l'image interpolée des isothermes de l'équation en coordonnées naturelles (3.9).

$$T_t + T_n \psi_s = Q \quad (3.9)$$

On a :

$$\begin{bmatrix} T_s \\ T_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\beta & \sin\beta \\ -\sin\beta & \cos\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \end{bmatrix}$$

où β est l'angle que fait l'isotherme avec l'axe x et T_x et T_y sont les gradients de température respectivement en x et en y de l'équation (3.3) (figure 9.1).

$$T_t + \psi_x T_y - \psi_y T_x = Q \quad (3.3)$$

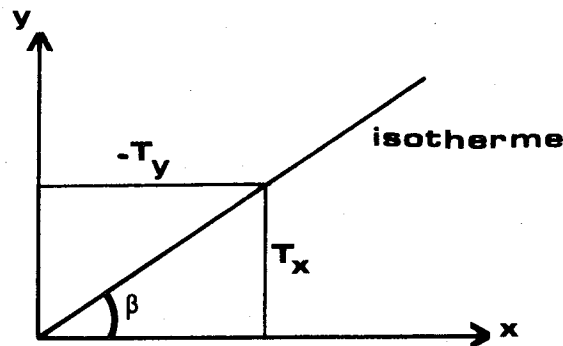


fig. 9.1 Calcul de l'angle β .

Le calcul de T_x et T_y en un point de coordonnées (i,j) se fait ainsi :

$$T_x = \frac{T_{j+a} - T_{j-a}}{2a}$$

$$T_Y = \frac{T_{i+a} - T_{i-a}}{2a}$$

où a est la distance de discrétisation ($a > 0$). Pour la détermination de T_x (resp. T_y), si l'une des deux composantes T_{j+a} (resp. T_{i+a}) ou T_{j-a} (resp. T_{i-a}) fait partie du masque alors elle est forcée à $T_{i,j}$ et le diviseur sera a et non $2a$.

Puis il faut déterminer l'angle β en considérant que le calcul de T_x et T_y entraîne un déphasage de $\pi/2$, (calcul du gradient) (cf. figure 9.1).

On a :

$$\operatorname{tg} \beta = - \frac{T_x}{T_y}$$

et on peut ainsi calculer :

$$T_n = - \sin \beta T_x + \cos \beta T_y$$

PARTIE 4

Résolution du modèle numérique

A l'aide de thermographies

CHAPITRE 10

Calcul de la

Fonction de courant

La fonction de courant ne peut être obtenue que si elle est initialisée en un point de chaque isotherme. Ce point d'initialisation sera facilement déterminé lorsque l'isotherme sera raccordée à la côte. Pour les isothermes non raccordées le problème est traité différemment et devient alors plus complexe. Afin d'améliorer la présentation graphique de cette fonction de courant une densification par interpolation bilinéaire sera effectuée pour obtenir une cartographie plus complète.

10.1 Initialisation de la fonction de courant

L'initialisation se fait par la création du fichier de la fonction de courant ψ . La fonction de courant prend une valeur d'initialisation ψ_0 sur les côtes définies par le masque et une valeur de rejet, par exemple -1.E32 en tous les points où ψ doit être estimée. Cette dernière valeur qui est a priori inatteignable par ψ indiquera les points où ψ est inconnue. Le point d'initialisation peut être un point particulier de l'isotherme dont la valeur est connue. Le traitement se fera de la même manière, si l'on considère que le point de rattachement à la côte est un point particulier de la fonction de courant, de valeur nulle.

10.2 Zones raccordées à la côte

L'équation (3.10) donne la variation de la fonction de courant ψ le long d'une isotherme :

$$\Delta\psi = \frac{-T_t \Delta S}{T_n} \quad (3.10)$$

on pose :

$$\Delta\psi = \psi(p+1) - \psi(p)$$

où $\psi(p)$ est la fonction de courant calculée au point p de coordonnées (x_p, y_p) et $\psi(p+1)$ la fonction de courant à déterminer au point $(p+1)$ de coordonnées (x_{p+1}, y_{p+1}) . Les points p et $(p+1)$ se trouvent sur la même isotherme T . T_n a été calculé préalablement et conservé dans un fichier. Par initialisation, la fonction de courant a la valeur ψ_0 sur la ligne de côte. Pour la suite des calculs on considèrera ΔS et T_t comme des constantes positives. On a donc :

$$\psi(p+1) = \psi(p) - (T_t \Delta S / T_n)$$

Le repère choisi est le repère curviligne (\vec{s}, \vec{n}) . \vec{n} fait un angle de $\pi/2$ avec \vec{s} et \vec{s} est orienté de p vers $(p+1)$ (figure 10.1).

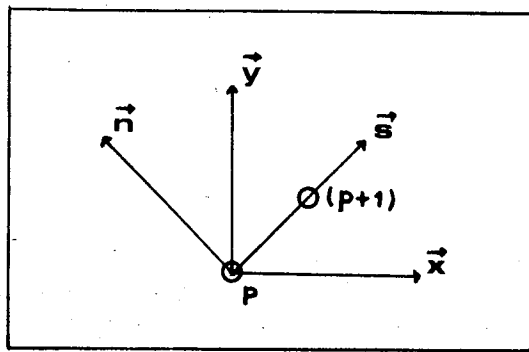


fig. 10.1 Les différents repères orthonormés (\vec{x}, \vec{y}) et (\vec{s}, \vec{n}) , p et $(p+1)$ appartiennent à l'isotherme T .

Il s'agit donc, se trouvant au point $(p+1)$ de déterminer le point p appartenant à la même isotherme T que $(p+1)$ et pour lequel $\psi(p)$ a été calculée. Pour cela il convient d'examiner les huit voisins de $(p+1)$.

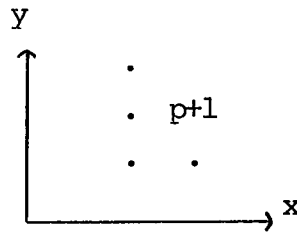
En fait T_n étant précalculé dans un repère orthonormé (\vec{x}, \vec{y}) sans tenir compte du signe de \vec{s} , il faudra dans certains cas modifier le signe de T_n (cf figure 10.1).

On distingue deux cas :

p est "avant" (p+1), c'est-à-dire :

$$\widehat{\cos(\vec{x}, \vec{s})} > 0 \text{ ou } (\widehat{\cos(\vec{x}, \vec{s})} = 0 \text{ et } \widehat{\sin(\vec{x}, \vec{s})} > 0)$$

conditions satisfaites par les quatre points suivants :



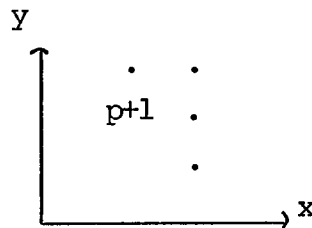
$\Psi(p+1)$ sera donnée par :

$$\Psi(p+1) = \Psi(p) - (T_c \Delta S / T_n)$$

p est "après" (p+1), c'est-à-dire :

$$\widehat{\cos(\vec{x}, \vec{s})} < 0 \text{ ou } (\widehat{\cos(\vec{x}, \vec{s})} = 0 \text{ et } \widehat{\sin(\vec{x}, \vec{s})} < 0)$$

conditions satisfaites par les quatre points suivants :



$\Psi(p+1)$ sera donnée par :

$$\Psi(p+1) = \Psi(p) + (T_c \Delta S / T_n)$$

On peut donc écrire :

$$\psi(p+1) = \psi(p) - (k \cdot T_t \cdot \Delta S / T_n)$$

où $k = 1$ quand p est "avant" ($p+1$) et $k = -1$ quand p est "après" ($p+1$).

On voit donc que le calcul de ψ dépend de la position de la ligne d'initialisation, "avant" ou "après" le point courant selon le balayage du fichier. Cette position conditionne également la rapidité d'exécution du programme comme le montre la discussion suivante.

Soit un fichier de I lignes et J colonnes, les isothermes sont horizontales. Le premier passage s'effectue de la ligne 1 à la ligne I et de la colonne 1 à la colonne J . L'examen des cas suivants a conditionné le choix du deuxième passage (figures 10.2 et 10.3).

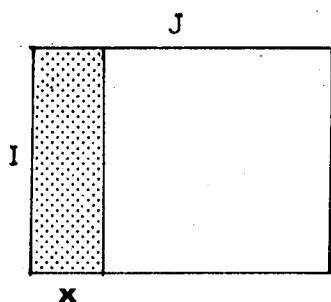


fig. 10.2 Initialisation à gauche de x colonnes.

Au premier passage de haut en bas et de gauche à droite la fonction de courant sera calculée pour tous les points.

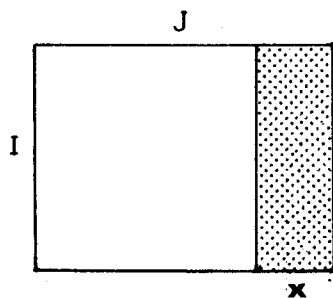


fig. 10.3 Initialisation à droite de x colonnes.

Au premier passage la fonction de courant sera calculée pour I points.

Pour un deuxième passage s'effectuant du bas vers le haut et de la gauche vers la droite, ψ aura été calculée pour $2I$ points (figure 10.4). On voit donc qu'il faudra $(J - x)$ passages pour calculer la fonction de courant pour tous les points. On alterne les passages, une fois de haut en bas, la suivante de bas en haut.

Par contre si le deuxième passage s'effectue de bas en haut et de la droite vers la gauche, ψ sera calculée pour tous les points en une seule passe.

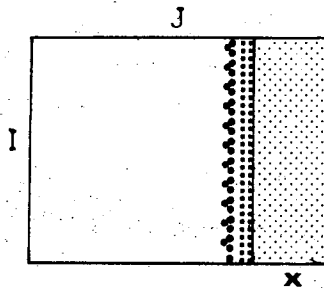


fig. 10.4 Exemple de calcul de la fonction de courant en deux passages avec initialisation à droite. (:) point calculé au premier passage, (*) point calculé au deuxième passage.

On a donc choisi de balayer le fichier alternativement du haut vers le bas et de gauche à droite, puis du bas vers le haut et de droite à gauche, jusqu'à ce que le nombre de points où la fonction de courant a été calculée soit nul.

Le premier calcul de la fonction de courant se fera près de la ligne de côte. Pour le point $(p+1)$ et si $\psi(p)$ au point p n'a pas été calculée il s'agit de déterminer si $(p+1)$ est voisin d'un point appartenant à la ligne de côte où la fonction de courant est initialisée à ψ_0 .

Pour cela on recherche le point voisin de $(p+1)$, t , appartenant à la

même isotherme et de coordonnées $(x_{p+1} + b, y_{p+1} + c)$ avec b et c entiers tels que :

$$-1 \leq b \leq 1 \text{ et } -1 \leq c \leq 1 \text{ et } b \text{ et } c \text{ non nuls en même temps.}$$

Les deux points $(p+1)$ et t définissent une droite qui se prolonge par le point m de coordonnées $(x_{p+1} - b, y_{p+1} - c)$.

Si pour m ou pour l'un des deux points n et r , voisins et de m et de $(p+1)$, la fonction de courant est connue (figure 10.5).

$$\psi(m) = \psi_0 \text{ ou } \psi(n) = \psi_0 \text{ ou } \psi(r) = \psi_0$$

alors $k = 1$ si m est "avant" $(p+1)$ et $k = -1$ si m est "après" $(p+1)$. $\psi(p+1)$ pourra être ainsi calculée, sinon le point suivant est examiné.

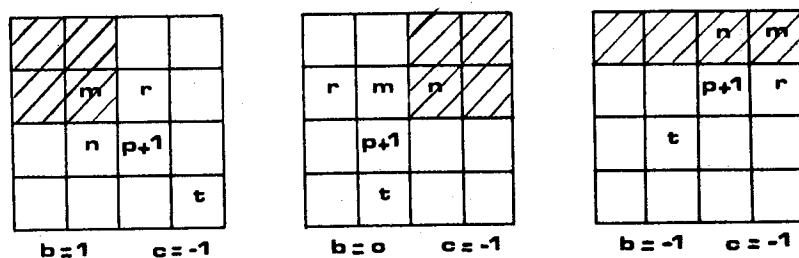


fig. 10.5 Différents exemples de raccordement des isothermes à la côte. Les zones hachurées représentent les points où la fonction de courant est connue. $(p+1)$ et t sont les deux points appartenant à l'isotherme.

10.3 Zones non raccordées à la côte

Pour le calcul de la fonction de courant ψ le long des isothermes non raccordées à la côte, plusieurs hypothèses ont été examinées. On a tout d'abord essayé les hypothèses les plus faibles possible, c'est-à-dire n'intervenant que sur les dérivées partielles de ψ .

10.3.1 Conservation du courant sur une zone de faibles dimensions

On peut supposer que sur un domaine où les isothermes sont presque parallèles, le courant est conservé sur une zone de dimensions petites vis-à-vis des dimensions du domaine :

$$\vec{U}(i_0, j_0) = \vec{U}(i, j) \quad \text{avec } i_0 = i \text{ ou } j_0 = j$$

Ceci est équivalent à la conservation des dérivées partielles de ψ , c'est-à-dire :

$$\begin{aligned} \psi_y(i_0, j_0) &= \psi_y(i, j) \\ \text{et} \\ \psi_x(i_0, j_0) &= \psi_x(i, j) \end{aligned}$$

10.3.2 Conservation de la composante perpendiculaire du courant

On peut aussi simplement supposer la conservation de la composante du courant perpendiculaire à l'isotherme, i.e. :

$$(\psi_s)_n = 0$$

avec les mêmes conditions géométriques que précédemment.

Il s'avère que les équations du problème ne permettent toutefois pas d'intégrer de manière unique les différentielles partielles de ψ et que par conséquent il n'est pas possible de remonter à la valeur absolue de ψ .

10.3.3 Ajustement statistique

Une troisième méthode repose sur un ajustement statistique de la solution ψ sur l'isotherme non raccordée. On suppose que la fonction de courant en un point d'une isotherme non raccordée à la côte est égale à la fonction de courant du point plus proche voisin d'une isotherme où ψ est définie. ψ peut alors être calculée sur toute l'isotherme et on obtient ainsi une représentation de ψ . On refait de même en tirant au sort un autre point de l'isotherme auquel on attribue la valeur de ψ du plus proche voisin d'une isotherme connectée et qui constitue à son tour une valeur d'initialisation pour le calcul. On obtiendra alors autant de représentations de ψ qu'il y a de points sur l'isotherme non connectée. Malheureusement ce processus itératif ne converge pas vers la vraie solution. En effet les conditions imposées et les équations utilisées portent toujours sur les différentielles de ψ qui n'est définie qu'à une infinité de fonctions partout parallèles aux isothermes près.

10.3.4 Continuité de la fonction de courant

La défection d'hypothèses faibles impose donc de donner des conditions plus fortes portant sur la valeur absolue de ψ . La physique des processus examinés entraîne la continuité de la fonction de courant ψ et c'est cette propriété qui va être utilisée.

Soit P_0 le premier point appartenant à l'isotherme T où la fonction de courant ψ est indéfinie. On définit une fenêtre F centrée en P_0 de côté r . On recherche sur F un point Q_0 , plus proche voisin de P_0 , où la fonction de courant $\psi(Q_0)$ est connue, ainsi qu'un deuxième point Q_1 appartenant à F tel que $\psi(Q_0) = \psi(Q_1)$.

On trace une droite D passant par Q_0 et Q_1 . L'intersection de cette droite avec l'isotherme T définit le point P_1 tel que :

$$P_1 = T \cap D, (T \neq D \text{ et } T \cap D \neq \emptyset)$$

(figure 10.6)

On suppose alors :

$$\psi(P_1) = \psi(Q_0) = \psi(Q_1)$$

Connaissant un point P_1 appartenant à T et où la fonction de courant est définie, on peut ainsi calculer ψ sur toute l'isotherme T par l'équation (3.10) :

$$\Delta\psi = \frac{-T_t \Delta S}{T_n} \quad (3.10)$$

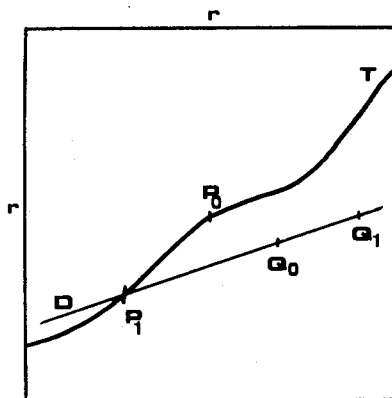


fig. 10.6 Exemple d'intersection de T avec D .

10.4 Interpolation bilinéaire

Cette méthode de calcul de la fonction de courant implique deux conditions nécessaires :

- l'initialisation de la fonction de courant par un point particulier de l'isotherme,
- la continuité des isothermes, afin que la fonction de courant se propage le long de celles-ci.

Il s'avère que ces conditions ne sont pas remplies pour toutes les isothermes. Si on veut obtenir une cartographie plus complète il s'agit d'interpoler bilinéairement la fonction de courant obtenue.

L'interpolation bilinéaire consiste en un filtrage 5x5 par moyenne arithmétique, avec la condition supplémentaire d'avoir au moins trois points appartenant au filtre, différents de la valeur de rejet de ψ pour attribuer la valeur du filtrage au point considéré.

CHAPITRE 11

Erreurs sur l'estimation

De la fonction de courant

L'erreur d'estimation de la fonction de courant ψ , σ_ψ , peut être calculée en fonction des erreurs commises sur les dérivées de la température T , σ_t pour T_t et σ_n pour T_n , les erreurs sur le temps et sur la localisation étant nulles ou négligeables.

Pour simplifier les calculs, nous poserons Q nul (cf. équation (3.11)). Ceci ne nuit pas à la généralité, puisque formellement le terme Q peut être intégré au terme T_t . Ainsi :

$$\Delta\psi = T_t \Delta S / T_n \quad (11.1)$$

$$\Delta\psi = f(T_t, T_n) \quad (11.2)$$

La variation élémentaire de $\Delta\psi$ est :

$$\begin{aligned} \delta(\Delta\psi) &= (\partial f / \partial T_n) \delta T_n + (\partial f / \partial T_t) \delta T_t \\ &= \frac{\delta T_n}{T_n} \left(\frac{T_t}{T_n} - \frac{\partial T_t}{\partial T_n} \right) + \frac{\delta T_t}{T_n} \left(T_t \frac{\partial T_n}{\partial T_t} - 1 \right) \end{aligned} \quad (11.3)$$

Les erreurs sur T_t et T_n étant indépendantes, l'erreur sur ψ s'écrit alors :

$$\begin{aligned} \sigma_\psi^2 &= \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial T_n} & \frac{\partial f}{\partial T_t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_n^2 & \sigma_{tn} \\ \sigma_{nt} & \sigma_t^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \partial f / \partial T_n \\ \partial f / \partial T_t \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{T_n^2} \left[\sigma_n^2 \left(\frac{T_t}{T_n} - \frac{\partial T_t}{\partial T_n} \right)^2 + \sigma_t^2 \left(\frac{T_t}{T_n} \frac{\partial T_n}{\partial T_t} - 1 \right)^2 \right] \end{aligned} \quad (11.4)$$

Cette équation met en évidence la grande influence du gradient thermique horizontal sur la précision du résultat.

Cette méthode d'estimation de l'erreur étant difficilement intégrable, nous avons préféré utiliser un autre moyen.

La détermination automatique de la précision du modèle sera estimée en parcourant de manière opposée la démarche utilisée pour calculer la fonction de courant. C'est-à-dire qu'en utilisant la fonction de courant et la première image satellitaire, la seconde sera estimée à partir de l'équation de conservation de la chaleur. La comparaison de cette estimation avec la seconde image réellement observée permettra de quantifier l'erreur commise en chaque pixel.

On désigne par ψ et T_2 respectivement la fonction de courant et la deuxième image satellitaire "vraies" et par ψ^* et T_2^* les estimations qui en sont faites.

L'équation de conservation de la chaleur s'écrit avec les quantités vraies :

$$T_t = \psi_y T_x - \psi_x T_y = (T_2 - T_1) / \Delta t \quad (11.5)$$

ou

$$(T_2 - T_1) / \Delta t = \psi_y T_x - \psi_x T_y \quad (11.6)$$

ou

$$T_2 = T_1 + (\psi_y T_x - \psi_x T_y) \Delta t \quad (11.7)$$

L'erreur sera déterminée en calculant une estimation de T_2 : T_2^* obtenue en injectant dans cette équation la fonction de courant calculée ψ^* :

$$T_2^* = T_1 + (\psi_y^* T_x - \psi_x^* T_y) \Delta t \quad (11.8)$$

L'erreur e , en chaque pixel est donnée par :

$$e = \frac{T_2 - T_2^*}{T_2} \quad (11.9)$$

On a donc :

$$e = \frac{T_2 - [T_1 + (\psi_y^* T_x - \psi_x^* T_y) \Delta t]}{T_2} \quad (11.10)$$

Cette erreur calculée, somme des erreurs de calcul, des incertitudes de mesure, de correction atmosphérique, etc..., est en fait une erreur introduite par le calcul numérique (erreurs d'arrondi que nous espérons très faibles).

Ce calcul d'erreur a été testé sur une image moyenne synthétique de températures croissantes de la gauche vers la droite. La fonction de courant trouvée est croissante linéairement du bas vers le haut et il en résulte une erreur nulle, ce qui montre que nos algorithmes n'introduisent ni de biais ni d'erreur mesurable dans le modèle.

CHAPITRE 12

Calcul et cartographie

Du vecteur courant

A partir de la fonction de courant, il est possible maintenant de calculer le champ de courant.

Les composantes du courant u et v sont calculées à l'aide de la fonction de courant ψ suivant les équations (3.2) :

$$u = - \psi_y$$

$$v = \psi_x$$

En un point de coordonnées (i, j) , ψ_x et ψ_y sont calculés comme suit :

$$\psi_x = \frac{\psi_{j+a} - \psi_{j-a}}{2a} \quad (12.1)$$

$$\psi_y = \frac{\psi_{i+a} - \psi_{i-a}}{2a} \quad (12.2)$$

où a est défini comme dans le chapitre 9.

Dans le cas où ψ_{j+a} , ψ_{j-a} , ψ_{i+a} ou ψ_{i-a} correspondent à des points du masque, on procède de même que pour les gradients de température (cf. chapitre 9).

La représentation d'un champ de courant se fait généralement à l'aide de flèches orientées selon le sens du courant et dont la longueur est proportionnelle à l'intensité de celui-là. Toutefois si les flèches sont tracées en tous les pixels, on obtient une cartographie assez confuse (figure 12.1). Les flèches représentant le vecteur courant sont très rapprochées les unes des autres et cela donne une cartographie touffue.

Ceci impose alors une nouvelle cartographie simplificatrice faite à la main, sélectionnant les mouvements généraux et moyennant les intensités (figure 12.2).

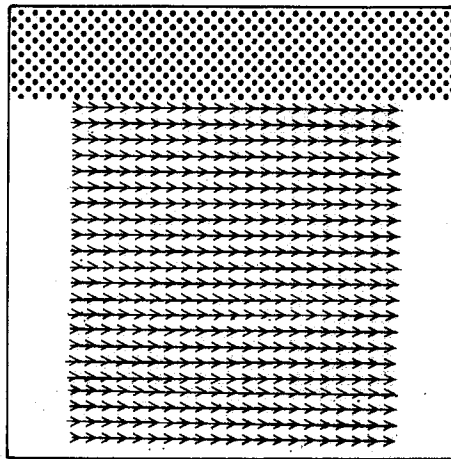


fig. 12.1 Cartographie de courants à partir de flèches tracées en chaque pixel. On peut noter la densité des flèches indiquant le sens du courant.

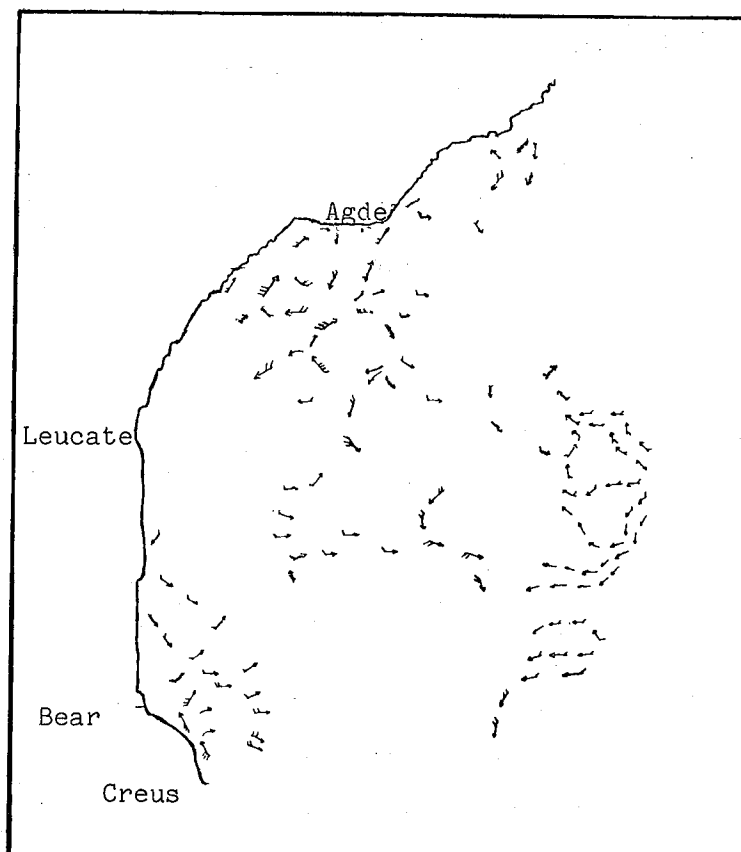


fig. 12.2 Représentation du vecteur courant (sud du cap d'Agde) dont la simplification a été réalisée manuellement afin d'obtenir une cartographie lisible.

Pour pallier cet inconvénient nous avons opté pour une représentation "colorée" du vecteur courant. Cette manière de procéder est assez courante maintenant. Toutefois nous avons pris en compte le fait que l'image doit être reproduite sur imprimante couleur et choisi pour ce faire une imprimante bon marché à trois couleurs jaune, rouge et cyan plus le noir. En utilisant un procédé de tramage, on peut produire environ 200 couleurs.

La correspondance entre couleur et vecteur courant s'effectue en affectant une couleur fondamentale au sens du courant et en liant l'intensité de cette couleur à l'intensité du courant. Cependant l'espace des couleurs est tridimensionnel, ce qui implique trois couleurs fondamentales. Toutefois en choisissant les couleurs cyan, rouge, vert et magenta, nous pouvons séparer le cercle unitaire des directions en quatre quadrants. Le bleu est attribué aux vecteurs situés dans le quadrant supérieur droit, le vert dans le quadrant inférieur droit, le rouge dans le quadrant inférieur gauche et le magenta dans le quadrant supérieur gauche.

Quant à l'intensité du courant, elle est recodée sur trois valeurs (figure 12.3), les forts courants étant codés avec une forte intensité colorée.

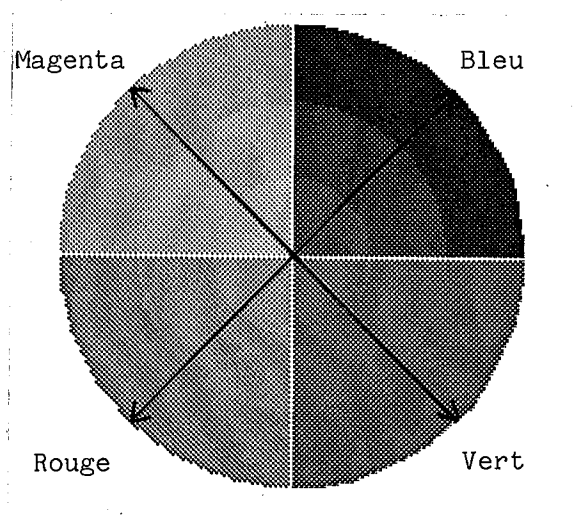


fig. 12.3 Légende des couleurs aidant à la représentation graphique du vecteur courant.

Cette présentation colorée du vecteur courant (figure 12.5) a été testée sur un fichier synthétique (figure 12.4) de la fonction de courant.

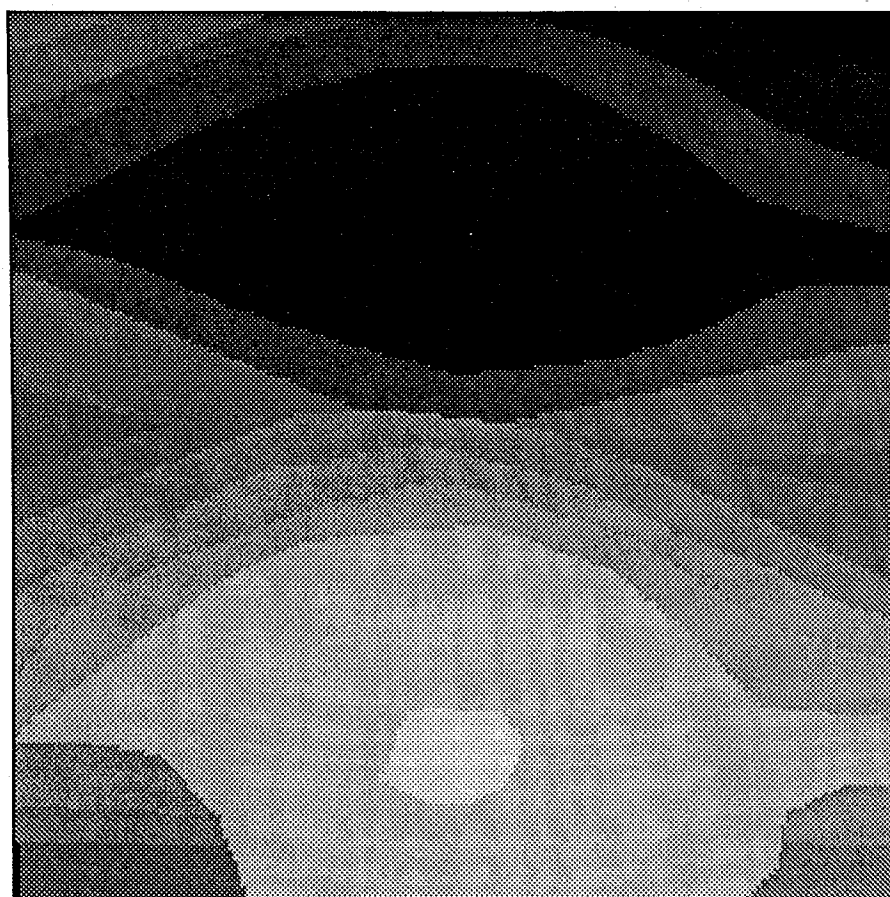


fig. 12.4 Fichier synthétique de la fonction de courant ψ croissant des teintes foncées vers les teintes claires. De cette fonction de courant est calculé le champ des vecteurs courant (figure 12.5).



fig. 12.5 Cartographie du vecteur courant de la fonction de courant ψ (figure 12.4). Nous pouvons ici noter la circulation du vecteur courant ainsi que son intensité suivant les codes choisis. Les zones en blanc correspondent à des vecteurs courant nuls.

Nous pouvons constater qu'il existe des zones où une couleur est incluse dans une autre. Ceci est dû au fait qu'une des deux composantes (verticale, v ou horizontale, u) du courant est nulle.

Ce phénomène est visible au milieu sur la droite de la figure (12.5). La direction et le sens du courant sont donnés par la veine centrale (bleue dans notre exemple) et le vert l'entourant signifie ici que la composante verticale est nulle.

Considérant ce cas, nous avons :

$$v = 0 \Rightarrow \psi_x = 0 \Rightarrow \psi_{j+a} = \psi_{j-a}$$

ce qui veut dire que ψ_{j+a} et ψ_{j-a} se trouvent dans la même zone, comme indiqué sur la figure (12.6).

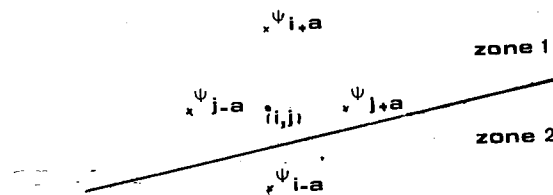


fig. 12.6 Exemple de proximité de zones.

Les cas où une des deux composantes est nulle sont traités comme sur la figure (12.7).

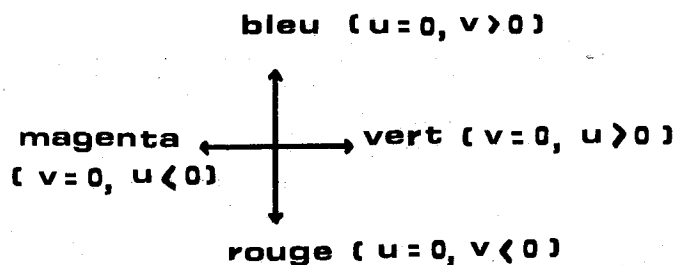


fig. 12.7 Cas où une des deux composantes (u ou v) est nulle.

Cette méthode de représentation colorée du vecteur courant est tout de même assez confuse car elle offre beaucoup d'informations sur la même image et on peut être amené à confondre intensité du courant (donnée par l'intensité de la couleur) et restriction sur la direction du courant.

Une deuxième représentation possible est de ne pas prendre en compte l'intensité du vecteur courant dans la représentation colorée et d'affiner la direction du vecteur. L'intensité pourra être représentée sur une autre image en dégradé de gris.

Pour ce faire chaque quadrant du cercle unitaire des directions est divisé en deux parties égales, d'intensité différente. Chaque intensité de couleur déterminera non plus l'intensité du courant mais sa direction, la couleur donnera toujours le sens du courant (figure 12.8).

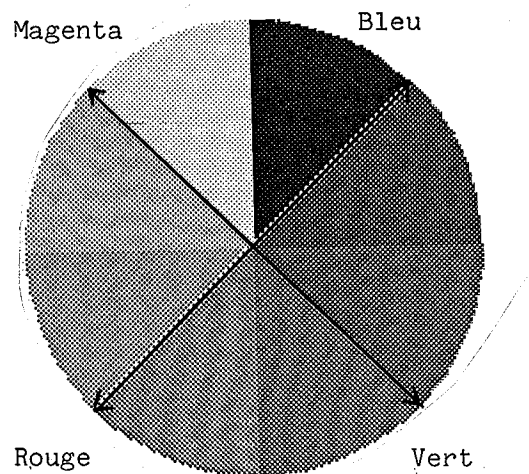


fig. 12.8 Légende des couleurs. Chaque portion de cercle indique le sens et la direction du vecteur courant.

On représente sur une autre image l'intensité du vecteur courant qui est déterminée par trois niveaux d'intensité de gris (figure 12.9), les courants faibles seront codés avec une faible intensité de gris.



fig. 12.9 Trois niveaux d'intensité de gris.

PARTIE 5

Exemples

Et conclusion

CHAPITRE 13

Exemples de calcul

Du courant marin de surface

Ce chapitre illustre les différentes étapes numériques de cette méthode de calcul du courant marin superficiel à l'aide de deux couples de thermographies.

Le premier couple d'images traité concerne un tourbillon issu du Gulf Stream et le deuxième, le courant Ligure dans le golfe du Lion.

Sauf indications contraires, pour les images en dégradé de gris, les comptes numériques sont croissants des teintes foncées vers les teintes claires.

13.1 Un tourbillon issu du Gulf Stream

Ce tourbillon du Gulf Stream est situé aux environs de 39° nord et $71,5^{\circ}$ ouest. Il est anti-cyclonique (sens des aiguilles d'une montre) avec une vitesse de surface tangentielle maximale d'environ 1,5 m/s. Sur l'extérieur la vitesse est moins importante, à peu près de 0,7 m/s.

Les données utilisées sont les thermographies, prises dans l'infrarouge, provenant du satellite NOAA-7.

Les données ont été corrigées des effets atmosphériques suivant les algorithmes de McClain et al. (1982). L'erreur estimée sur les thermographies, en valeur absolue, est de l'ordre de $0,5^{\circ}\text{C}$. Les thermographies sont ensuite corrigées géométriquement par rapport à une projection cartographique Mercator donnant une précision meilleure qu'un pixel.

La première thermographie (figure 13.1) est datée du 113^{ème} jour Julien (23 avril 1982), 24 heures la séparent de la deuxième thermographie (figure 13.2) datée du 114^{ème} jour Julien. Les figures (13.3) et (13.4) montrent les champs de température en degré Celsius, pour les précédentes thermographies. "H" (High) signifie que le courant laisse les hautes valeurs de température sur sa droite, "L" (Low) dénote un tourbillon cyclonique.

La résolution de l'équation d'advection nécessite l'obtention de l'image moyenne (figure 13.5) qui a d'abord été filtrée (filtrage par moyenne arithmétique 5x5) afin d'éliminer les fréquences parasites puis

interpolée plage par plage afin d'augmenter le nombre des isothermes, (la figure (13.6) décrit le champ de température moyen) ainsi que l'image différence (figure 13.7) dont les comptes numériques réels ont été augmentés de 128 afin que les différences négatives soient représentées.

L'image des contours (figure 13.8), nécessaire pour la détermination de la fonction de courant a été calculée avec un pas de 3 afin d'avoir le plus grand nombre d'isothermes continues.

L'initialisation de la fonction de courant est faite le long du rayon pour lequel l'angle est de 180° , à partir du centre du tourbillon. Les valeurs d'initialisation (figure 13.9) sont déterminées en intégrant la courbe (figure 13.10) représentant les vitesses angulaires du courant le long du rayon du tourbillon en partant du centre.

On obtient ainsi l'image de la fonction de courant (figure 13.11) densifiée par la suite (figure 13.12) par une interpolation bilinéaire afin d'obtenir une cartographie plus complète. Malheureusement le calcul de la fonction de courant n'a pu se faire sur toutes les isothermes pour deux raisons : toutes les isothermes ne coupent pas le rayon supportant les valeurs d'initialisation de la fonction de courant et certaines isothermes sont discontinues (la fonction de courant ne pouvant pas se propager le long de l'isotherme). Le vecteur courant calculé à partir de la fonction de courant est représenté sur la figure (13.13). Sur la même image sont cartographiés et le sens et la direction du vecteur courant.

Afin d'estimer l'erreur commise sur la fonction de courant, la deuxième thermographie a été recalculée (figure 13.14) à partir de l'équation de conservation de la chaleur. En comparant cette image avec la deuxième thermographie réellement observée nous obtenons l'erreur (en pourcentage) commise sur le calcul de ψ (figure 13.15). La valeur maximum de l'erreur est de 60% sur les zones à faible gradient.



fig. 13.1 Première thermographie du Gulf Stream pour le 113 ème jour julien
(23 avril 1982).



fig. 13.2 Deuxième thermographie du Gulf Stream pour le 114 ème jour julien
(24 avril 1982).

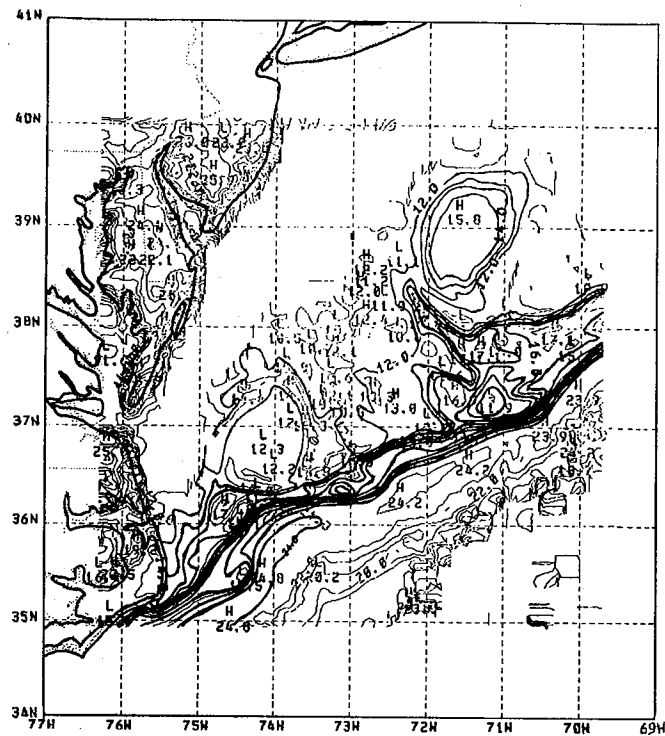


fig. 13.3 Champ de température en degré Celsius pour le 113 ème jour julien. "L" (Low) dénote un tourbillon cyclonique, "H" (High) signifie que le courant laisse les hautes valeurs de température sur sa droite.

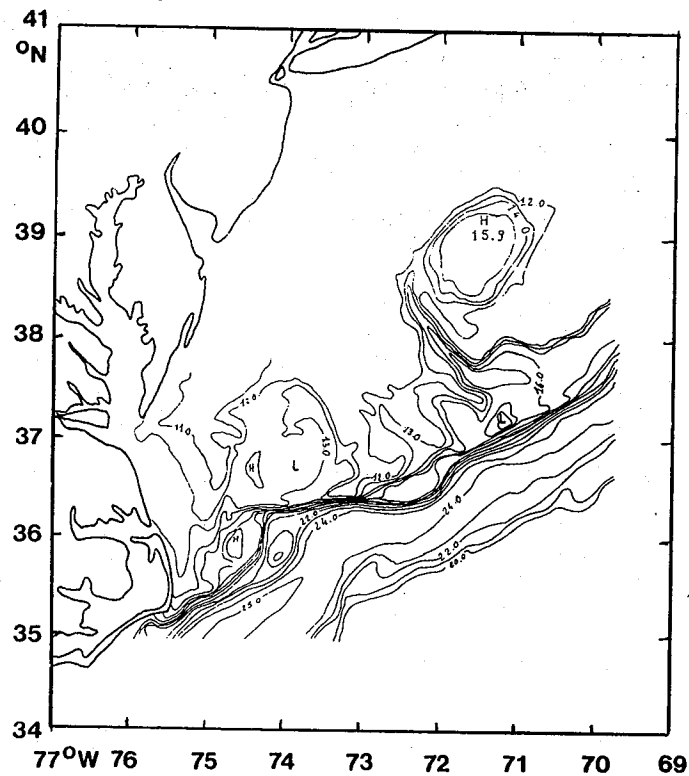


fig. 13.4 Champ de température en degré Celsius pour le 114 ème jour julien. Le tourbillon test est centré sur 39° nord, 71,5° ouest.



fig. 13.5 Image moyenne filtrée arithmétiquement puis interpolée.

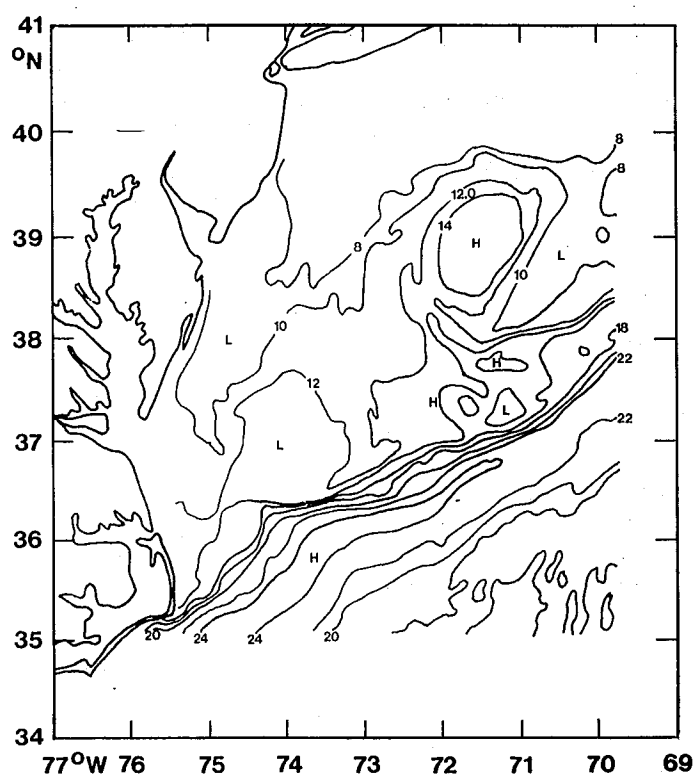


fig. 13.6 Champ de température moyen pour les jours julien 113 et 114.

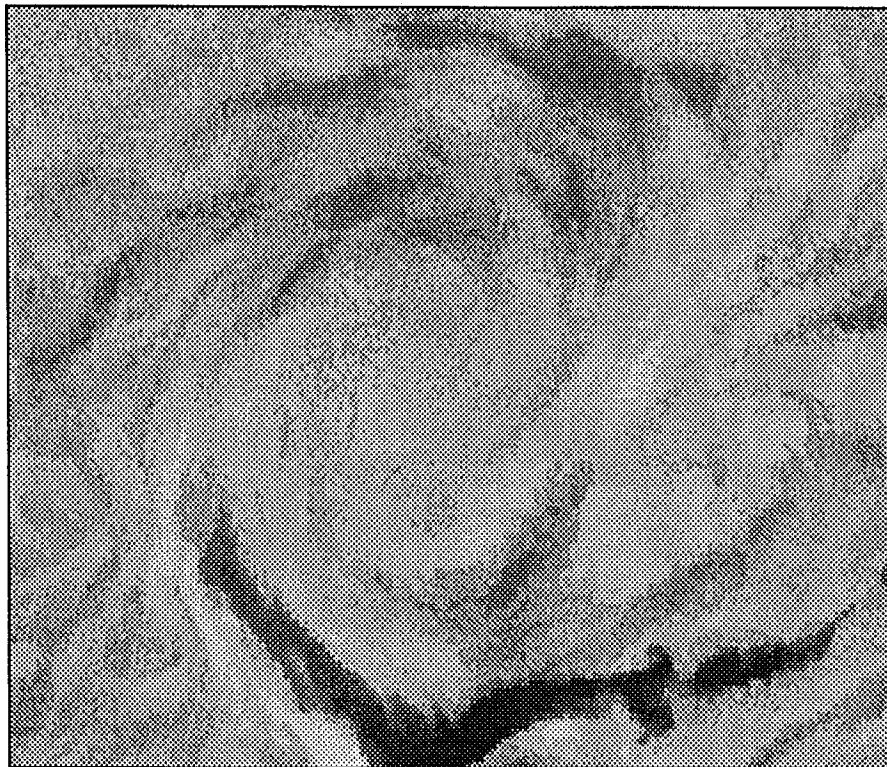


fig. 13.7 Image différence recentrée sur le compte numérique 128.

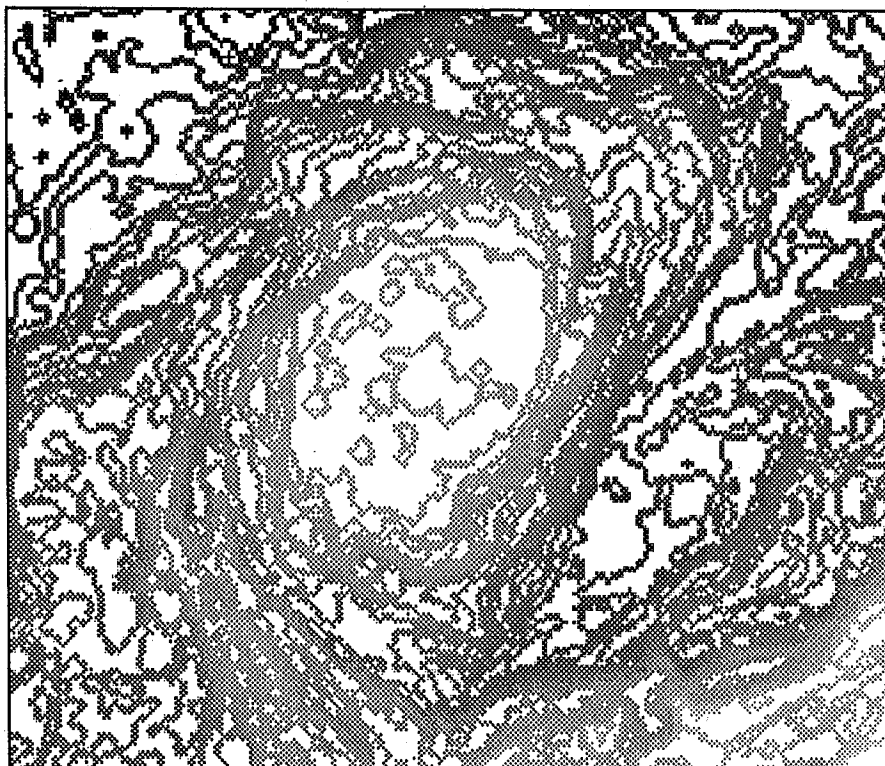


fig. 13.8 Image des contours réalisée avec un pas de 3.

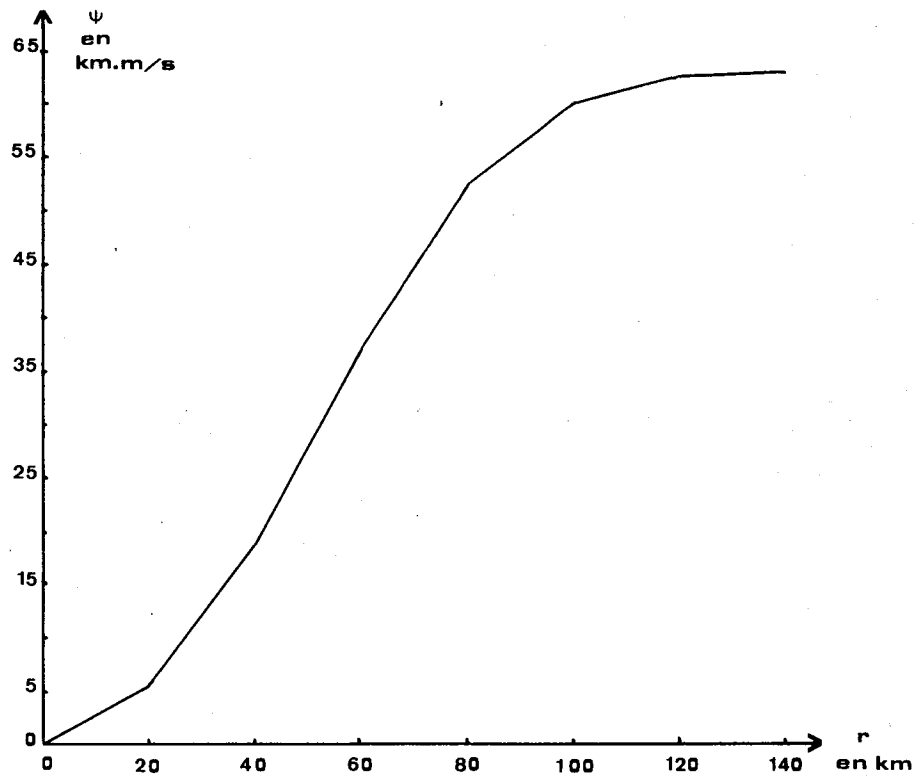


fig. 13.9 Valeurs d'initialisation de la fonction de courant le long du rayon du tourbillon.

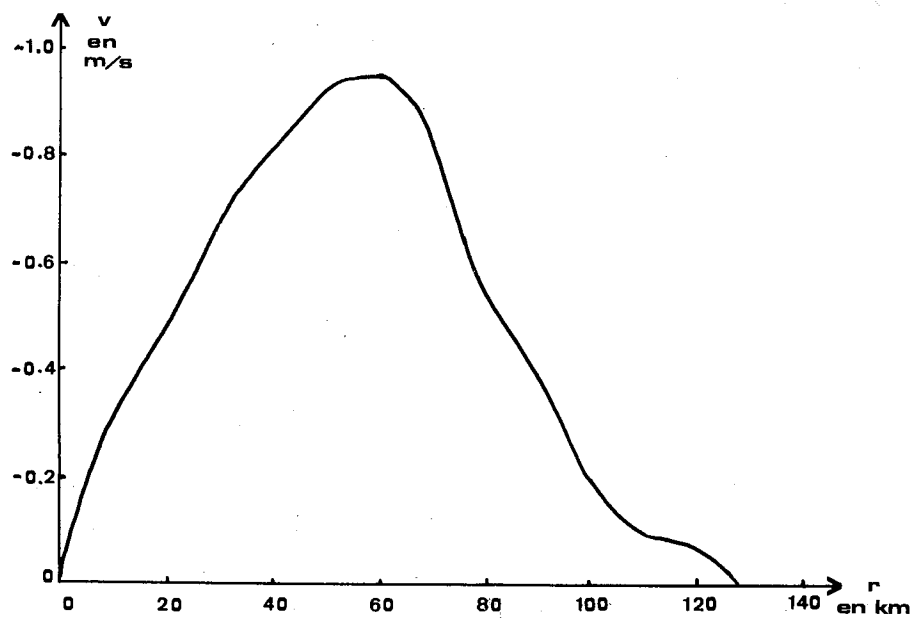


fig. 13.10 Vitesses angulaires à l'intérieur du tourbillon, en fonction de la distance au centre, estimées par des mesures hydrologiques.

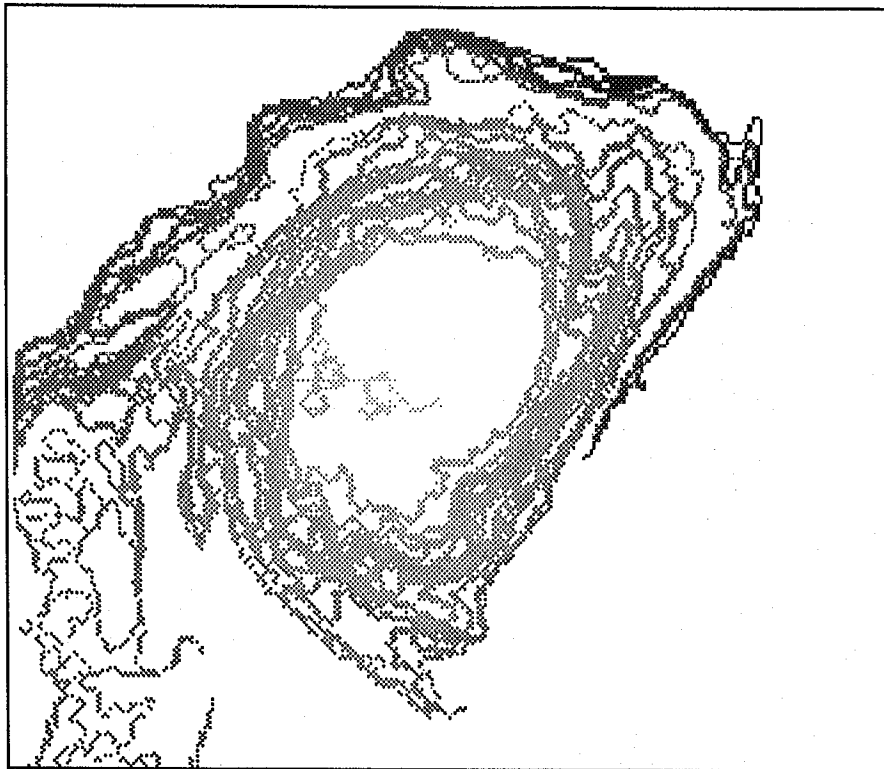


fig. 13.11 Fonction de courant le long des isothermes connectées au rayon d'initialisation.

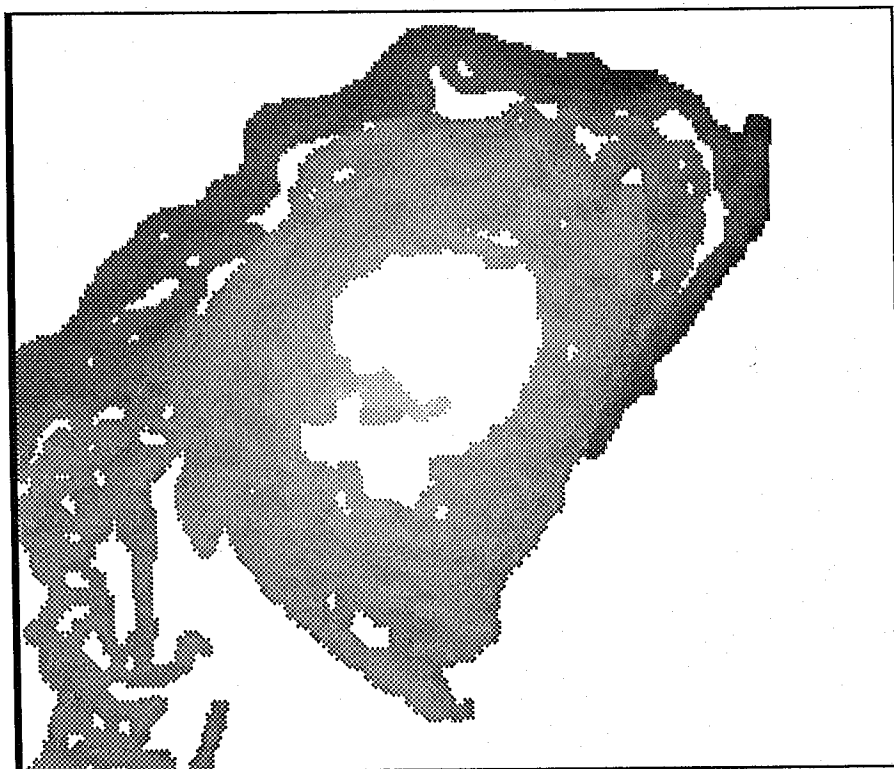
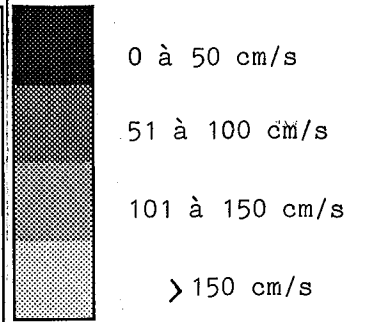


fig. 13.12 Fonction de courant densifiée par interpolation bilinéaire.

(a)



0 à 50 cm/s
51 à 100 cm/s
101 à 150 cm/s
> 150 cm/s

(b)

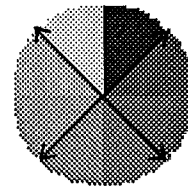
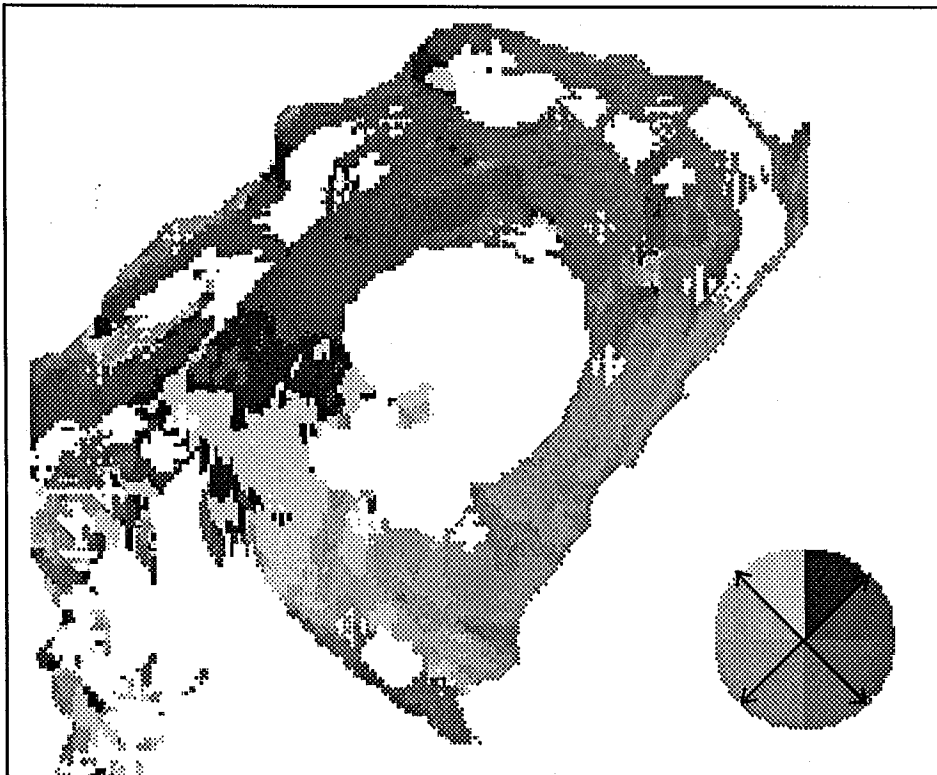


fig. 13.13 Vecteur courant le long de la fonction de courant (intensité (a), sens et direction (b)).

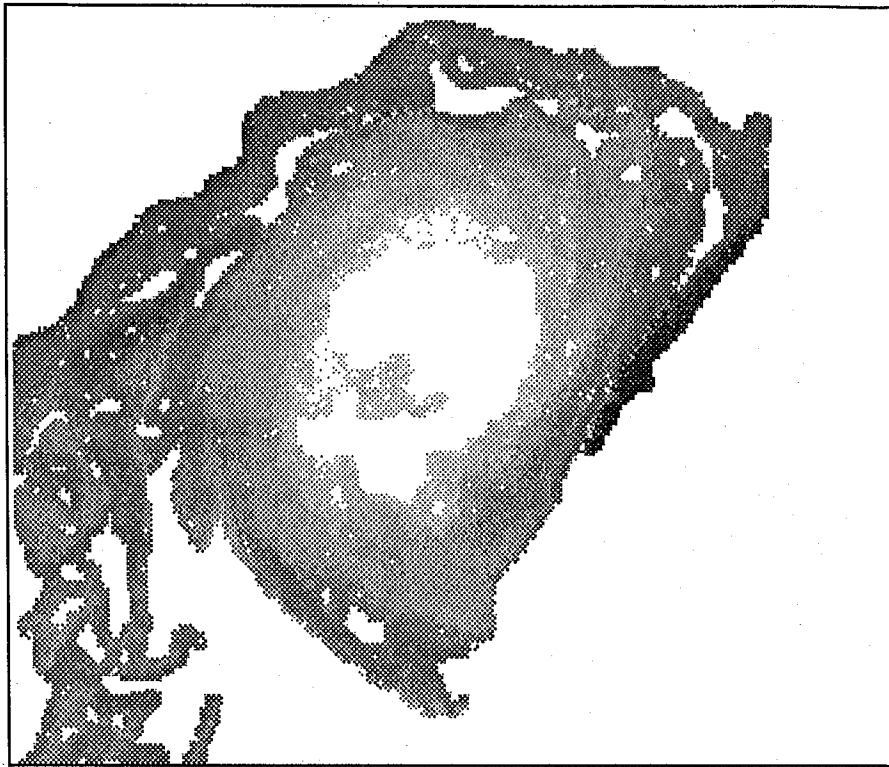


fig. 13.14 Deuxième thermographie recalculée à partir de l'équation de conservation de la chaleur. Le calcul n'a été réalisé que pour les points en coïncidence avec la fonction de courant densifiée.

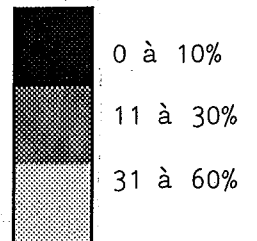
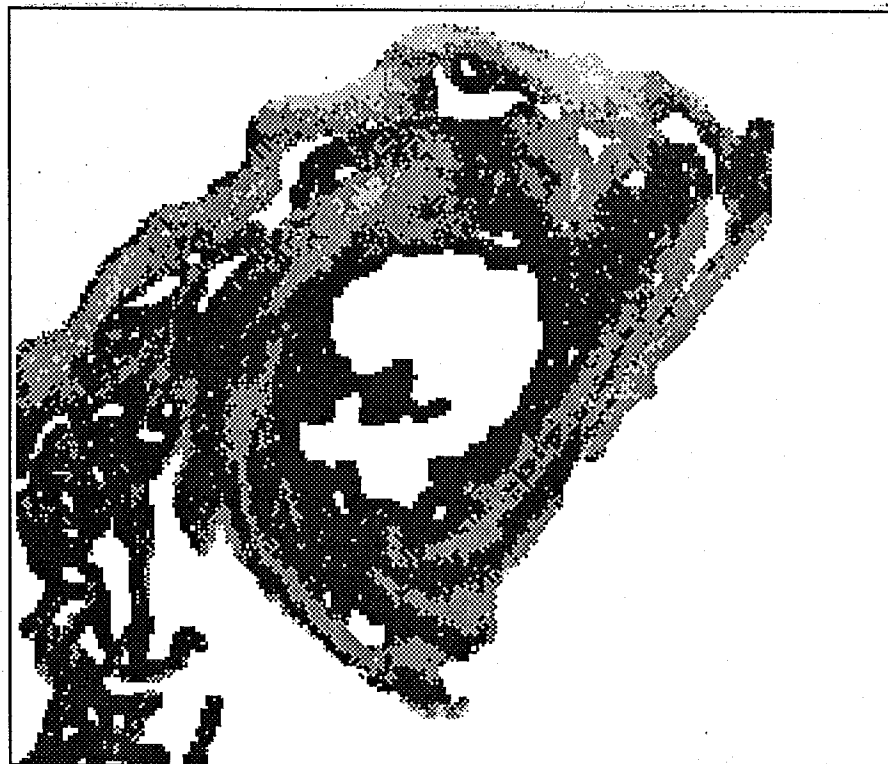


fig. 13.15 Erreur commise sur la fonction de courant. Erreur croissante des teintes foncées vers les teintes claires.

13.2 Le courant Ligure dans le golfe du Lion

En mer Ligure, la circulation générale est cyclonique (sens opposé des aiguilles d'une montre). Deux flots entrent en mer Ligure de part et d'autre de la Corse, en provenance du sud. Les flux superficiels en mer Ligure sont importants et les vitesses de surface sont en moyenne de l'ordre de 30 à 50 cm/s.

Les images utilisées sont les thermographies, prises dans l'infrarouge, provenant du satellite NOAA-7.

Les données ont été corrigées géométriquement par rapport à une projection cartographique Lambert 3.

La zone du courant Ligure étudiée se trouve dans le golfe du Lion, au large de Marseille (figure 13.16).

La première thermographie (figure 13.17) est datée du 15 juillet 1981, 24 heures la séparent de la deuxième thermographie datée du 16 juillet 1981 (figure 13.18).

Comme pour l'exemple précédent, la résolution de l'équation d'advection nécessite l'obtention de l'image différence (figure 13.19) ainsi que l'image moyenne filtrée par une moyenne arithmétique 3x3 afin d'éliminer les fréquences parasites puis interpolée plage par plage afin d'augmenter le nombre des isothermes (figure 13.20).

De même l'image des contours (figure 13.21), a été réalisée avec un pas de 3 afin d'augmenter le nombre d'isothermes continues nécessaires au calcul de la fonction de courant.

L'initialisation de la fonction de courant est faite le long de la ligne de côte à laquelle est attribuée une valeur de fonction de courant nulle.

On obtient ainsi l'image de la fonction de courant (figure 13.22), calculée le long des isothermes connectées à la côte, densifiée par la suite (figure 13.23) par une interpolation bilinéaire afin d'obtenir une cartographie plus complète. Le calcul de la fonction de courant n'a pu se faire sur toutes les isothermes car celles-ci ne sont pas toutes connectées la côte et certaines sont discontinues. Le vecteur courant calculé à partir de la fonction de courant est représenté sur la figure (13.24), seuls sont

représentés la direction et le sens du courant. Sur la figure (13.25) est cartographiée l'intensité du vecteur courant.

Afin d'estimer l'erreur commise sur la fonction de courant, la deuxième thermographie a été recalculée (figure 13.26) à partir de l'équation de conservation de la chaleur. En comparant cette image avec la deuxième thermographie réellement observée nous obtenons l'erreur (en pourcentage) commise sur le calcul de ψ (figure 13.27). La valeur maximum de l'erreur est de 10% sur les zones à faible gradient.

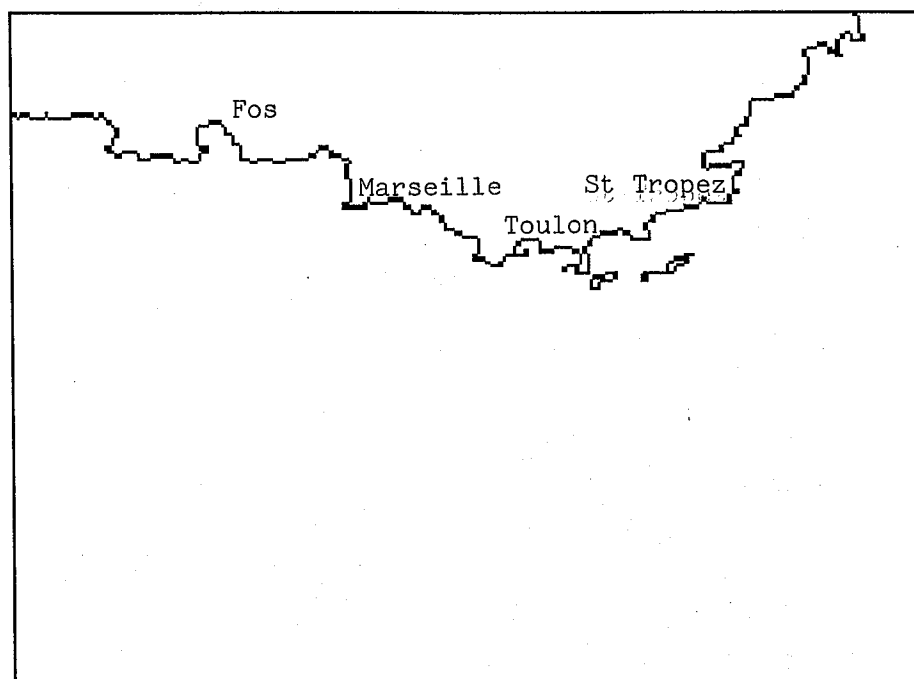


fig. 13.16 Position géographique du courant Ligure dans la zone étudiée.



fig. 13.17 Première thermographie du golfe du Lion datée du 15 juillet 1981.

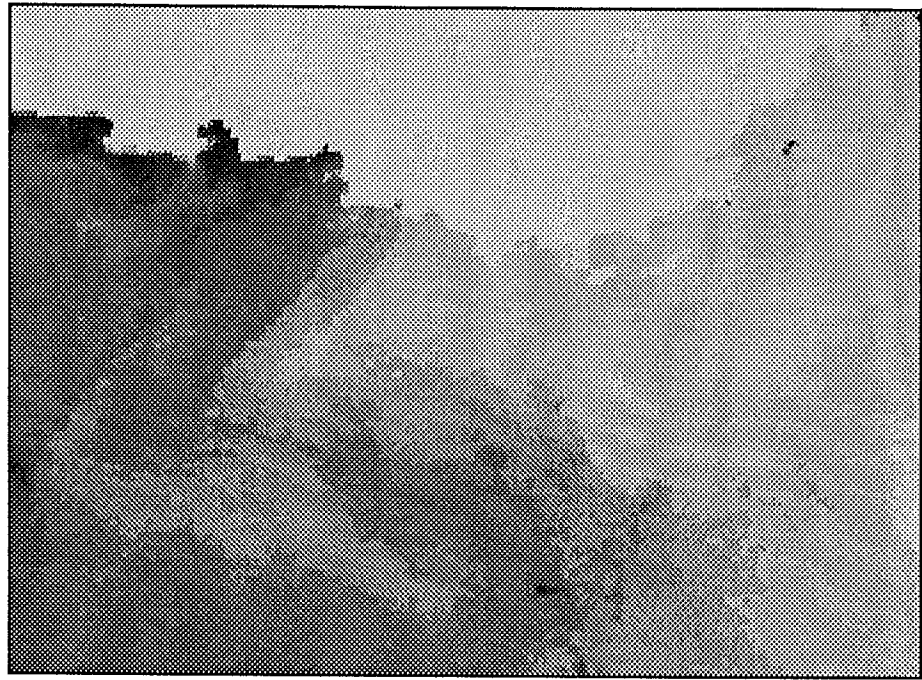


fig. 13.18 Deuxième thermographie du golfe du Lion datée du 16 juillet 1981.

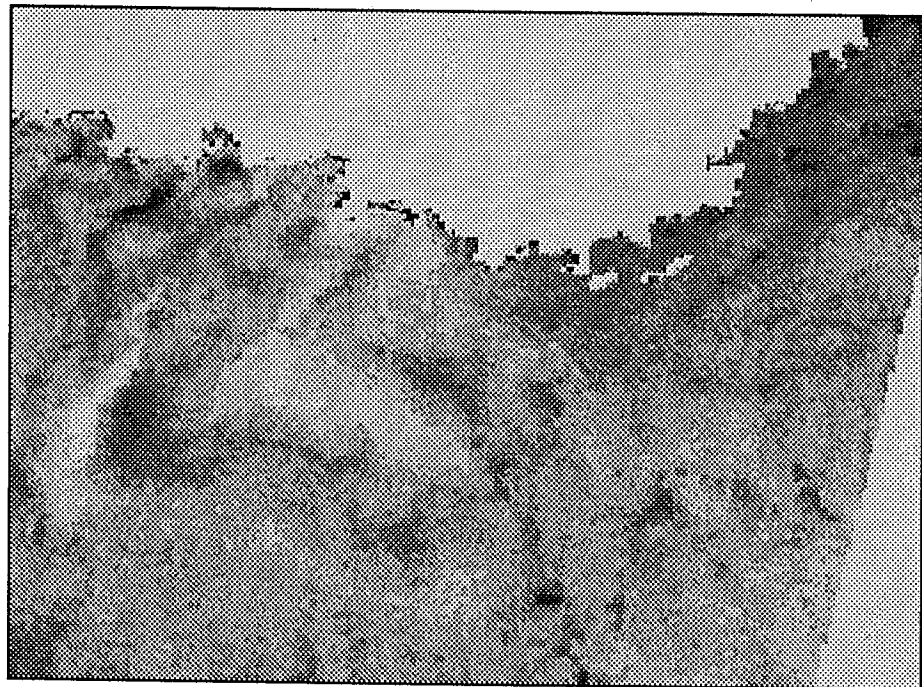


fig. 13.19 Image différence recentrée sur le compte numérique 128.

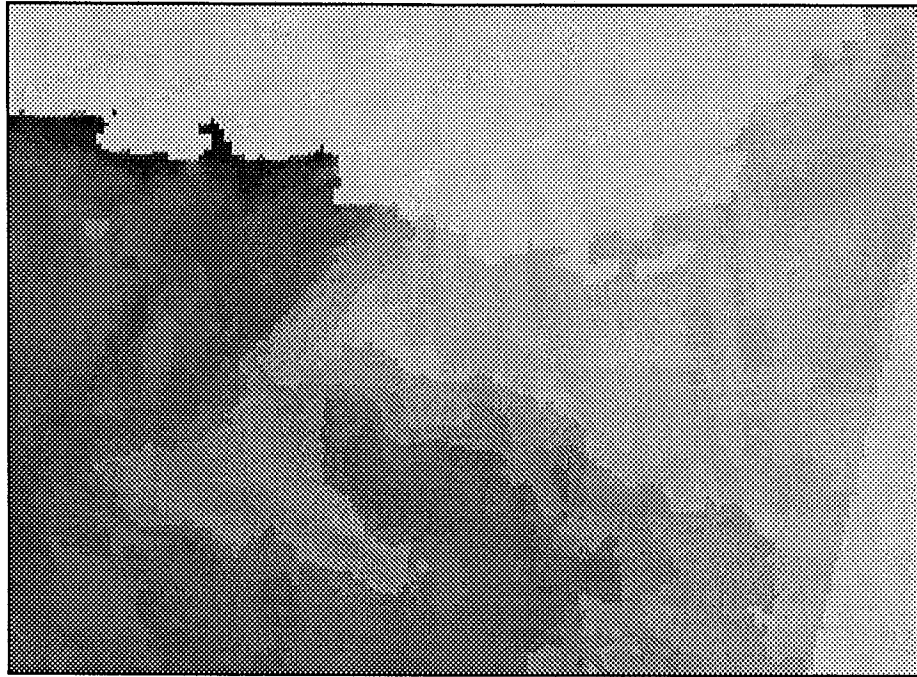


fig. 13.20 Image moyenne filtrée arithmétiquement puis interpolée.

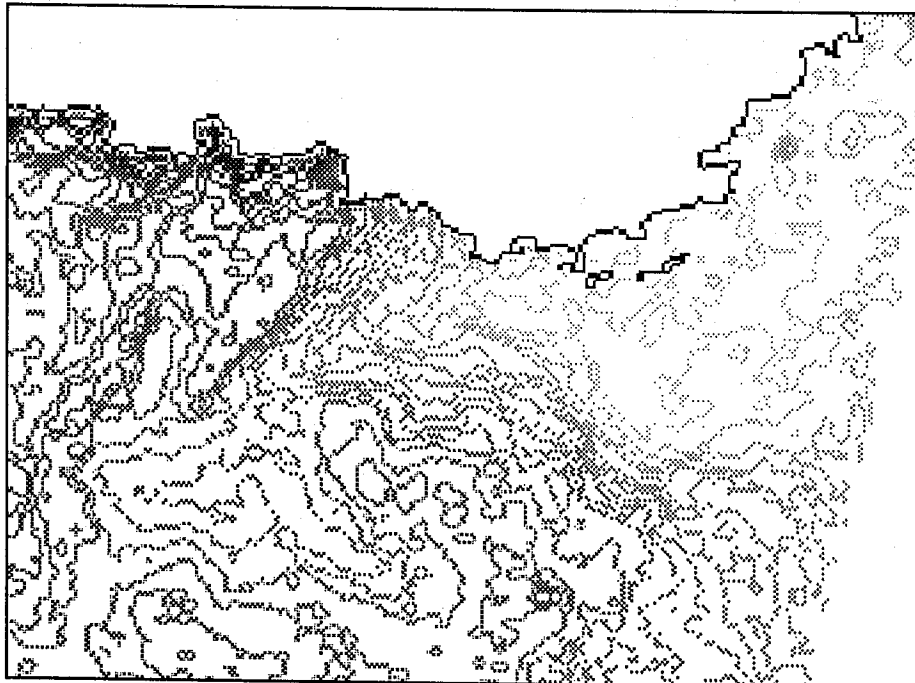


fig. 13.21 Image des contours réalisée avec un pas de 3.

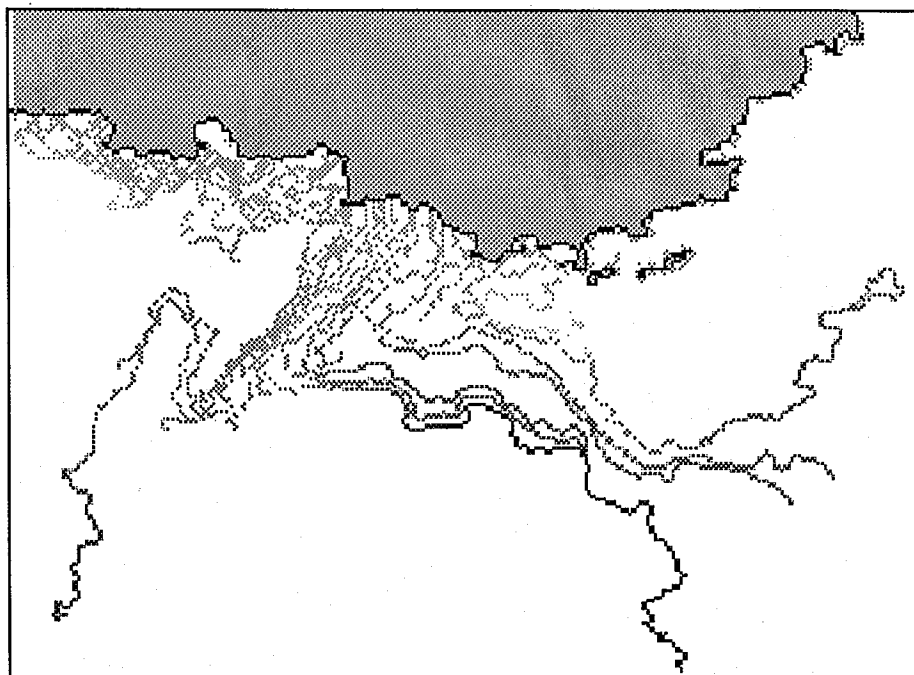


fig. 13.22 Fonction de courant le long des isothermes connectées à la côte.

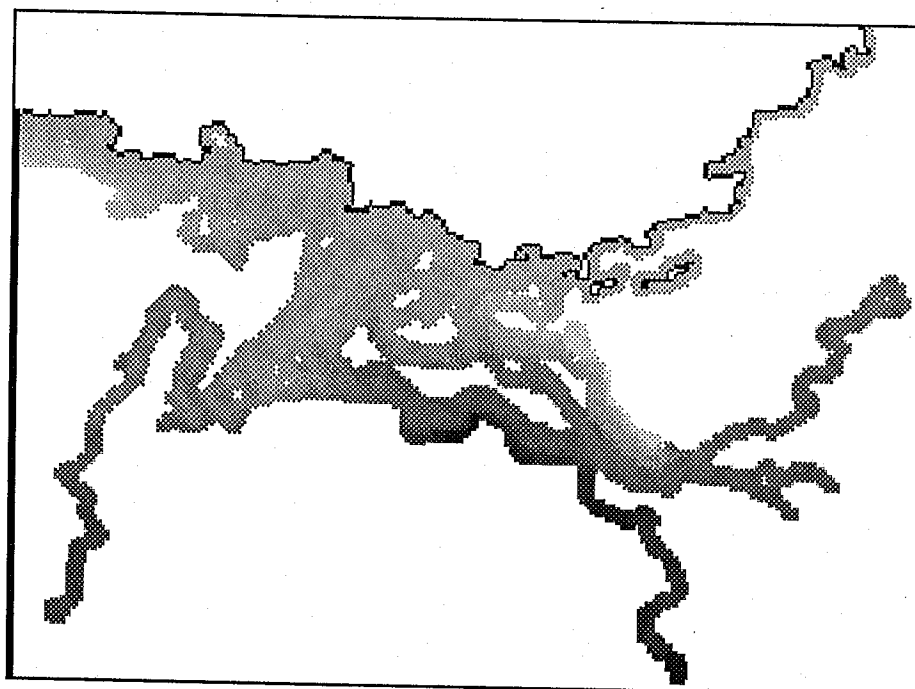


fig. 13.23 Fonction de courant densifiée par une interpolation bilinéaire.

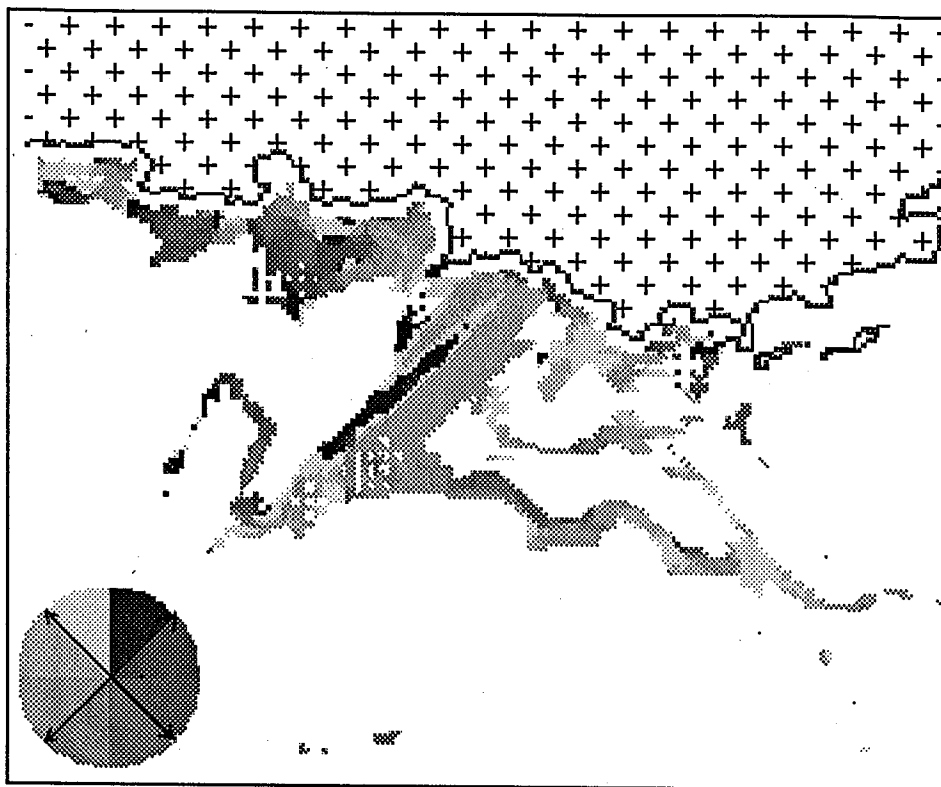
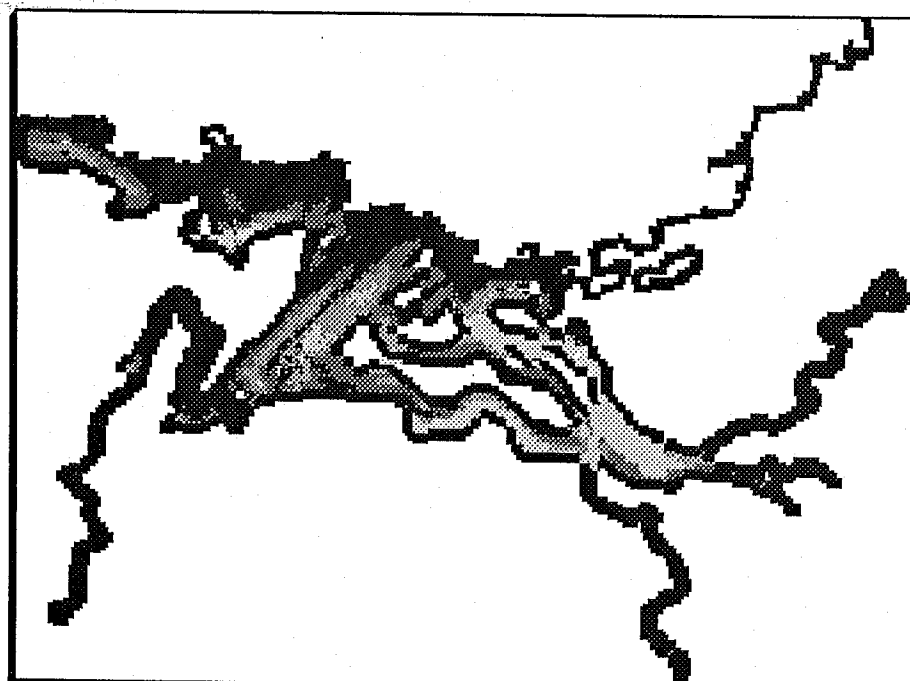


fig. 13.24 Vecteur courant (sens et direction).



0 à 10 cm/s
11 à 20 cm/s
21 à 30 cm/s
> 30 cm/s

fig. 13.25 Intensité du vecteur courant.

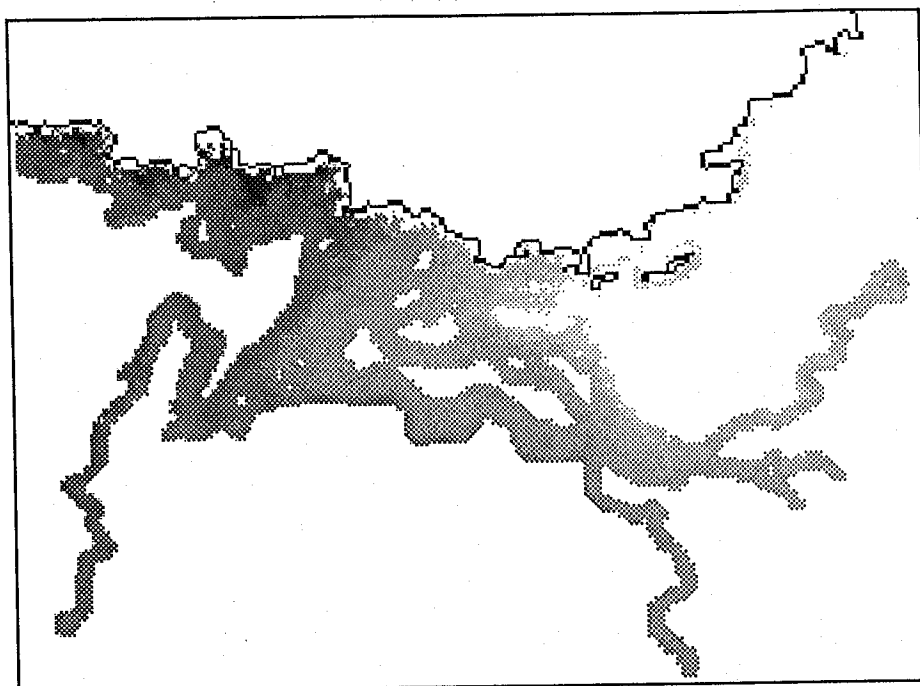


fig. 13.26 Deuxième thermographie recalculée à partir de l'équation de conservation de la chaleur.

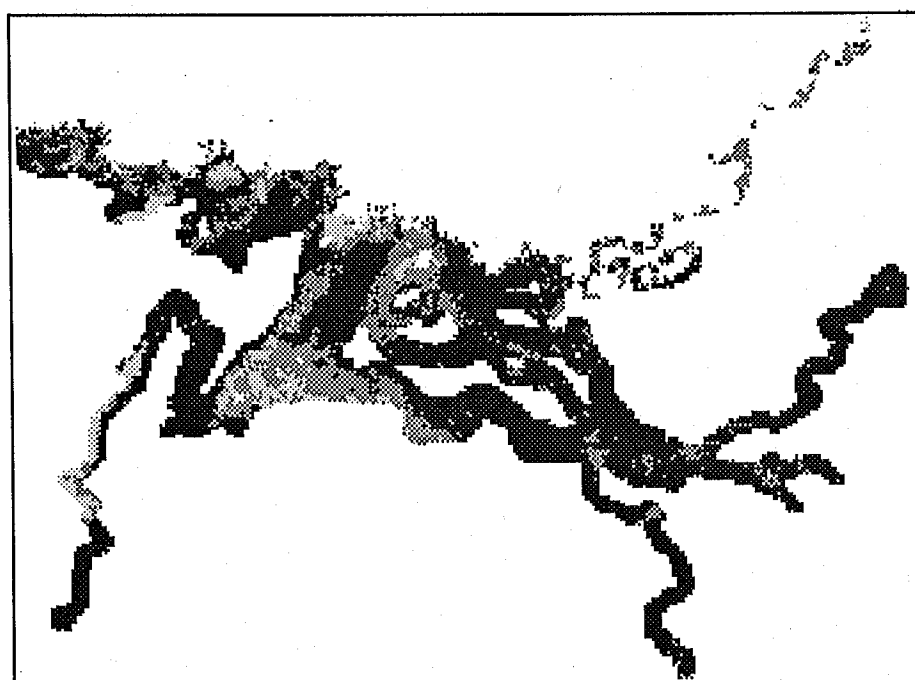


fig. 13.27 Erreur commise sur la fonction de courant.

CHAPITRE 14

Conclusion

Et perspectives

La cartographie du courant superficiel océanique à partir d'une série diachronique de thermographies, présentée dans cette thèse, a été possible grâce aux satellites météorologiques qui fournissent quotidiennement des images de la température de surface de la mer.

La méthode de calcul, basée sur la résolution numérique de l'équation de la chaleur réduite à une équation d'advection instationnaire, suppose que la variation de chaleur en un point est due à un apport ou perte de chaleur par le courant (advection) et par l'atmosphère.

Le terme d'échanges thermiques $Q(x,y)$ supposé nul tout au long de la résolution de l'équation peut avoir de l'importance dans certaines situations instables (coup de vent brusque), mais il est toutefois difficile à estimer et la validité de l'équation (3.1) est à rediscuter.

Les étapes du traitement numérique présentées dans les parties 2 et 3 (obtention des thermographies à partir d'images satellitaires et traitement des images) ne concernent pas spécialement le calcul du champ de courant mais peuvent être utilisées pour d'autres traitements d'images (satellitaires ou autres).

Toutes les images acquises par satellite, dans le proche ou moyen infrarouge, demandent un étalonnage du capteur satellitaire afin de transformer les mesures reçues en températures, ainsi que d'éliminer les composantes atmosphériques qui transforment le signal émis par la surface de la mer.

Sans se restreindre aux thermographies satellitaires, généralement l'acquisition des images par le satellite s'effectue à l'aide d'un radiomètre à balayage et au vu des spécificités d'acquisition il est nécessaire de rectifier l'image acquise afin d'uniformiser les surfaces des pixels. Par ailleurs, il est utile lorsqu'on dispose d'une série d'images satellitaires représentant la même zone géographique, de les avoir dans la même projection cartographique (Mercator, Lambert 3, etc...) ; elles

deviendront ainsi superposables les unes aux autres. Pour ce faire, la méthode analytique permettant de recalculer la position du pixel dans la cartographie choisie à l'aide des paramètres d'attitude du satellite a été abandonnée car nécessitant de gros moyens de calcul, en faveur d'une méthode d'estimation statistique avec prise d'amers. Cette méthode est simple et facile à mettre en oeuvre. Toutefois elle demande un nombre suffisant d'amers ce qui n'est pas réalisable en haute mer par exemple.

Le filtrage des images est nécessaire afin d'éliminer les fréquences indésirables. Celles-ci proviennent d'une part des opérations de corrections atmosphériques et d'autre part d'un phénomène d'aliasing. Toutefois, nous nous sommes rendus compte qu'il n'était pas aisé de concilier toutes les contraintes imposées par notre problème, c'est-à-dire éliminer le bruit et certaines petites échelles, mais surtout respecter les forts gradients. Quelques essais montrent qu'intuitivement un filtre médian ou modal semble le mieux adapté à notre problème.

La moyenne et la différence d'images ne posent pas de problèmes particuliers. Cependant il ne faut pas oublier de recentrer l'image différence par rapport à un compte numérique (128 par exemple) afin que les valeurs négatives soient représentées.

La cartographie des contours demande de l'attention car le choix du pas avec lequel on réalise les contours peut être, pour notre étude, déterminant dans l'extraction des isothermes. En effet, la résolution de notre méthode nécessite le plus grand nombre possible d'isothermes. On aurait donc tendance à choisir un faible pas, mais il faut surtout que ces isothermes soient continues pour que la fonction de courant puisse se propager le long de celles-ci. Il faut donc augmenter le pas, et dans notre cas, un pas de 3 a donné les meilleurs résultats.

Afin d'augmenter les points de résolution de l'équation pour obtenir une meilleure cartographie du courant une interpolation a été réalisée. Deux méthodes d'interpolation ont été testées afin de pouvoir concilier fiabilité du résultat et célérité du calcul, toutes deux prenant appui sur une transformée en distance. La première méthode dite "interpolation point

par point" est réalisée à partir de l'image des contours de l'image moyenne en faisant appel à l'image transformée en distance selon l'algorithme de Yokoi et al. (8 connexes). Cette méthode est fiable de par ses algorithmes utilisés (l'erreur sur la transformée en distance est très faible, 1 à 6%). La valeur attribuée au point considéré est une moyenne pondérée qui prend en compte les valeurs des isothermes les plus proches ainsi que leurs distances respectives. Il faut noter cependant que cette méthode est limitée par la taille de la fenêtre utilisée pour la recherche des plus proches isothermes (limitations imposées par la machine et le langage de programmation). Le temps d'exécution est extrêmement long, mais il peut varier favorablement selon la machine utilisée et ne devenir qu'un problème mineur. En fait la méthode retenue est l'interpolation dite "plage par plage", qui se fait à partir de la cartographie de l'image moyenne, du fait de sa rapidité d'exécution. Le calcul de la transformée en distance selon l'algorithme de Rosenfeld (4 connexes) est réalisé en même temps que l'interpolation. Cette méthode offre le désavantage d'être imprécise sur les distances sur la diagonale (40% d'erreur) et les valeurs extrêmes ne sont pas respectées. Ce dernier défaut peut être éliminé par un retraitement manuel de l'image très fastidieux étant donnée la complexité des images.

La partie 4, spécifique à notre méthode, développe le calcul proprement dit.

Le champ de courant est déterminé le long des isothermes interceptant un ensemble de points pour lesquels la fonction de courant est connue (côte ou points particuliers de l'isotherme). Le calcul de la fonction de courant se fait pas à pas le long des isothermes. Il faut donc que celles-ci soient continues et que la fonction de courant y soit initialisée. Il s'avère que ces conditions ne sont pas toujours remplies, pour cela une interpolation bilinéaire est nécessaire afin d'obtenir une cartographie plus complète.

La détermination automatique de la précision du modèle est faite en parcourant de manière opposée la démarche utilisée pour calculer la

fonction de courant à partir de l'équation de conservation de la chaleur. Cette erreur calculée est en fait la somme de toutes les erreurs commises à chaque étape du traitement numérique des images.

La cartographie du vecteur courant nous a demandé une attention toute particulière afin qu'elle soit facilement interprétable. Pour cela nous avons opté pour une représentation colorée de la direction et du sens du courant selon 6 directions, l'intensité du vecteur courant est représenté sur une autre image en dégradé de gris.

L'analyse d'un tourbillon issu du Gulf Stream et du courant Ligure dans le golfe du Lion illustre les différentes étapes de ce calcul du courant superficiel. Les résultats obtenus pour le Gulf Stream sont satisfaisants et ont pu être facilement comparé aux mesures in situ car il s'agit d'un tourbillon beaucoup étudié. La comparaison des mesures trouvées pour le courant Ligure dans le golfe du Lion est plus délicate et il a fallu s'en tenir à un courant moyen dans le golfe du Lion.

Cette méthode de détermination du courant marin de surface à partir de thermographies satellitaires est délicate à mettre en oeuvre car le nombre de points de résolution de l'équation est souvent très faible et il en résulte une cartographie du vecteur courant difficile à réaliser.

Liste
Des
Illustrations

<u>figure</u>	<u>légende</u>	<u>page</u>
figure 3.1	Carte de la profondeur normalisée de la thermocline dans le golfe du Lion, 24 heures après le début d'un coup de vent, d'après un modèle numérique (Hua, 1981).	20
figure 3.2	Evolution dans le temps du profil vertical de température après le début d'un coup de vent, d'après un modèle numérique (Guillard, 1984).	21
figure 5.1	Caractéristiques géométriques du balayage par le miroir tournant du radiomètre (NOAA).	36
figure 5.2	Paramètres géométriques terrestres et satellitaires.	37
figure 5.3	Géométrie des différents paramètres par rapport au satellite et à la terre.	38
figure 5.4	Découpage et superposition des carrés.	43
figure 6.1	Effets de pépité.	50
figure 6.2	Exemple de variogramme pour le canal C5 (Heyraud, 1985).	50
figure 6.3	Abaque des longueurs d'onde L_N en m.	53
figure 6.4	Thermographie du Gulf Stream provenant du satellite NOAA-7 et datée du 23 avril 1982. Les teintes claires de l'image correspondent au domaine terrestre.	56
figure 6.5	Filtrage par moyenne arithmétique. On peut noter la dégradation de la côte et la disparition des petites structures ainsi qu'une impression de flou.	57

- figure 6.6 Filtrage médian. La côte a été lissée mais les contours restent nets (l'impression de flou a disparu). Les petites structures ont disparu. 57
- figure 6.7 Filtrage modal. Les petites structures ont disparu mais on peut constater que la côte n'a pas été lissée. 58
- figure 6.8 Filtrage à coefficients choisis conditionné par la variance locale. Les coefficients sont égaux à 1 et le seuil est de 10. On peut noter que la côte est respectée et que certaines petites structures ont disparu. 58
- figure 8.1 Exemple de calcul de transformée en distance pour le cas des 4 connexes. 68
- figure 8.2 Séquences des opérations pour le calcul de la transformée en distance dans le cas des 8 connexes. 69
- figure 8.3 Exemple de calcul de transformée en distance pour le cas des 8 connexes. 70
- figure 8.4 Les d_Y sont représentés par des triangles, les d_R par des ronds, le trait continu représente la distance euclidienne. 72
- figure 8.5 Interpolation point par point. 74
- figure 8.6 Interpolation plage par plage. 76
- figure 8.7 Exemple de profil de plages de température interpolées. Le trait plein représente la valeur initiale des plages, le pointillé la valeur interpolée. Notons que le minimum de valeur 120 n'est pas respecté. 78

figure 8.8	La plage 120 a été modifiée. Nous avons remplacé les valeurs extrêmes par la valeur 119 et nous avons ainsi un minimum à 120.	79
figure 9.1	Calcul de l'angle β .	81
figure 10.1	Les différents repères orthonormés (\vec{x}, \vec{y}) et (\vec{s}, \vec{n}) , p et (p+1) appartiennent à l'isotherme T.	86
figure 10.2	Initialisation à gauche de x colonnes.	88
figure 10.3	Initialisation à droite de x colonnes.	88
figure 10.4	Exemple de calcul de la fonction de courant en deux passages avec initialisation à droite. (**) point calculé au premier passage, (*) point calculé au deuxième passage.	89
figure 10.5	Différents exemples de raccordement des isothermes à la côte. Les zones hachurées représentent les points où la fonction de courant est connue. (p+1) et t sont les deux points appartenant à l'isotherme.	90
figure 10.6	Exemple d'intersection de T avec D.	93
figure 12.1	Cartographie de courants à partir de flèches tracées en chaque pixel. On peut noter la densité des flèches indiquant le sens du courant.	101
figure 12.2	Représentation du vecteur courant (sud du Cap d'Agde) dont la simplification a été réalisée manuellement afin d'obtenir une cartographie lisible.	101
figure 12.3	Légende des couleurs aidant à la représentation graphique du vecteur courant.	102

- figure 12.4 Fichier synthétique de la fonction de courant ψ croissant des teintes foncées vers les teintes claires. De cette fonction de courant est calculé le champ des vecteurs courant (figure 12.5). 103
- figure 12.5 Cartographie du vecteur courant de la fonction de courant ψ (figure 12.4). Nous pouvons ici noter la circulation du vecteur courant ainsi que son intensité suivant les codes choisis. Les zones en blanc correspondent à des vecteurs courant nuls. 104
- figure 12.6 Exemple de proximité de zones. 105
- figure 12.7 Cas où une des deux composantes (u ou v) est nulle. 105
- figure 12.8 Légende des couleurs. Chaque portion de cercle indique le sens et la direction du vecteur courant. 106
- figure 12.9 Trois niveaux de dégradé de gris. 106
- figure 13.1 Première thermographie du Gulf Stream pour le 113 ème jour julien (23 avril 1982). 111
- figure 13.2 Deuxième thermographie du Gulf Stream pour le 114 ème jour julien (24 avril 1982). 111
- figure 13.3 Champ de température en degré Celsius pour le 113 ème jour julien. "L" (Low) dénote un tourbillon cyclonique, "H" (High) signifie que le courant laisse les hautes valeurs de température sur sa droite. 112
- figure 13.4 Champ de température en degré Celsius pour le 114 ème jour julien. Le tourbillon test est centré sur 39° nord, 71,5° ouest. 112

figure 13.5	Image moyenne filtrée arithmétiquement puis interpolée.	113
figure 13.6	Champ de température moyen pour les jours julien 113 et 114.	113
figure 13.7	Image différence recentrée sur le compte numérique 128.	114
figure 13.8	Image des contours réalisée avec un pas de 3.	114
figure 13.9	Valeurs d'initialisation de la fonction de courant le long du rayon du tourbillon.	115
figure 13.10	Vitesses angulaires à l'intérieur du tourbillon, en fonction de la distance au centre, estimées par des mesures hydrologiques.	115
figure 13.11	Fonction de courant le long des isothermes connectées au rayon d'initialisation.	116
figure 13.12	Fonction de courant densifiée par interpolation bilinéaire.	116
figure 13.13	Vecteur courant le long de la fonction de courant.	117
figure 13.14	Deuxième thermographie recalculée à partir de l'équation de conservation de la chaleur. Le calcul n'a été réalisé que pour les points en coïncidence avec la fonction de courant densifiée.	118
figure 13.15	Erreur commise sur la fonction de courant.	118
figure 13.16	Position géographique du courant Ligure dans la zone étudiée.	121

figure 13.17 Première thermographie du golfe du Lion datée du 15 juillet 1981.	121
figure 13.18 Deuxième thermographie du golfe du Lion datée du 16 juillet 1981.	122
figure 13.19 Image différence recentrée sur le compte numérique 128.	122
figure 13.20 Image moyenne filtrée arithmétiquement puis interpolée.	123
figure 13.21 Image des contours calculée avec un pas de 3.	123
figure 13.22 Fonction de courant le long des isothermes connectées à la côte.	124
figure 13.23 Fonction de courant densifiée par une interpolation bilinéaire.	124
figure 13.24 Vecteur courant (sens et direction).	125
figure 13.25 Intensité du vecteur courant.	125
figure 13.26 Deuxième thermographie recalculée à partir de l'équation de conservation de la chaleur.	126
figure 13.27 Erreur commise sur la fonction de courant.	126

Références

Bibliographiques

Brown, O.B., Evans, R.H., Evidence for zonally-trapped propagating waves in the Eastern Atlantic from satellite sea surface temperature observations, *Boundary-Layer Meteorology*, 18, 145-157, 1980.

Crépon, M., Wald, L., Monget, J.M., Low frequency waves in the Ligurian sea during december 1977, *Journal of Geophysical Research*, 87, C1, 595-600, 1982.

Deschamps, P.Y., Télédétection de la température de surface de la mer par radiométrie infrarouge. Thèse d'état, Univ. Lille, n° 376, 1977.

Deschamps, P.Y., Phulpin, T., Atmospheric correction of infrared measurements of sea surface temperature using channels at 3.7, 11 and 12 micron, *Boundary-Layer Meteorology*, 18, 131-143, 1980.

Guillard, H., Etude de l'influence de la paramétrisation des processus turbulents sur la prévision des couches marines superficielles, Thèse de 3ème cycle, Univ. Aix-Marseille II, 1984.

Harris, T.F.W., Legeckis, R., Van Foreest, D., Satellite infrared images of the Agulhas current system, *Deep-Sea Research*, 25, 543-548, 1978.

Heyraud, Ph., Analyse statistique appliquée à l'imagerie satellitaire, rapport DEA, Univ. Aix-Marseille II, 1985.

Horman, M.H., Temperature analysis from multispectral infrared data, *Applied Optics*, 15, 9, 2099-2014, 1976.

Hua, B.L., Modélisation numérique d'upwellings côtiers à l'aide d'une méthode d'éléments finis. Application au golfe du Lion. Thèse d'état, Univ. Paris VI, 1981.

Koslov, V.P., Excluding the effect of the atmosphere in the remote sensing of the radiant temperature of the water surface, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 14, 9, 685-690, 1978.

Llewellyn-Jones, D.T., Minett, P.J., Saunders, R.W., Zavody, A.M., Satellite multi-channel infrared measurements of SST of the N.E. Atlantic Ocean using AVHRR/2, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 110, 613-631, 1984.

McClain, E.P., Pichel, W.G., Walton, C.C., Ahmad, Z., Sutton, J., Multi-channel improvements to satellite-derived global sea surface temperatures, Advanced Space Research, 2, 6, 43-47, 1983.

Millot, C., Wald, L., The effect of Mistral wind on the Ligurian current near Provence, Oceanologica Acta, 3, 4, 399-402, 1980.

Ninnis, R.M., Emery, W.J., Collins, M.J., Automated Extraction of Pack Ice Motion From Advanced Very High Resolution Radiometer Imagery, Journal of Geophysical Research, Vol. 91, No. C9, Pages 10,725-10,734, 1986.

Prabhakara, C., Dalu, G., Kunde, V.G., Estimation of sea surface temperature from remote sensing in the 11 to 13 micron window region, Journal of Geophysical Research, 79, 33, 5039-5044, 1974.

Rosenfeld, A., Pfaltz, J.L., Sequential operations in digital picture processing, Journal of the Association for Computing Machinery, vol. 13, n° 4, pp. 471-494, 1966.

Saunders, P.M., Tracing surface flow with surface isotherms, Mémoires de la Société Royale des Sciences de Liège, 6ème série, VI, 99-108, 1973.

Strong, A.E, McClain, E.P., Improved ocean sea surface temperatures from space-comparisons with drifting buoys, Bulletin of the American Meteorological Society, February 1984.

Tanaka, S., Sugimura, T., Nishimura, T., Ninomiya, Y., Hatakeyama, Y., Compilation of the Kuro-Shio current vector map from NOAA-6/AVHRR data and consideration of oceanic eddies and the short period fluctuation of the Kuro-Shio, Japan Remote Sensing Review, 2, 3, 11-30, 1982.

Vukowich, F.M., The detection of nearshore eddy motion and wind-driven currents using NOAA-1 sea surface temperature data, Journal of Geophysical Research, 79, 6, 853-860, 1974.

Wald, L., Nihous, G., Ligurian Sea : annual variation of the sea surface thermal structures as detected by satellite NOAA 5, Oceanologica Acta, 3, 4, 465-469, 1980.

Wald, L., Relations entre le champ de température et le champ de courant, observations de l'état de surface et mesure de la vitesse du vent, la dynamique de la couche superficielle en mer Ligure. Thèse d'état, Univ. de Toulon et du Var, 1985.

Yokoi, S., Toriwaki, J.I., Fukumura, T., On generalized distance transformation of digitized pictures, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. pami-3, n° 4, 1981.

Bibliographie

Albuisson, M., Monget, J.M., Wald, L., Texture et Image de Télédétection, Atelier "Hétérogénéité en Télédétection", Strasbourg, 1987.

Blanc, T.V., Accuracy of Bulk-Method-Determined Flux, Stability, and Sea Surface Roughness, Journal of Geophysical Research, Vol. 92, No. C4, 3867-3876, 1987.

Bovik, A.C., Huang, T.S., Munson D.C., The Effect of Median Filtering on Edge Estimation and Detection, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. pami-9, No. 2, 1987.

Emery, W.J., Thomas, A.C., Collins, M.J., An Objective Method for Computing Advective Surface Velocities From Sequential Infrared Satellite Images, Journal of Geophysical Research, Vol. 91, No. C11, Pages 12,878-12,878, 1986.

Emery, W.J., Thomas, A.C., Collins, M.J., Crawford, W.R., Mackas, D.L., Comparison Between Satellite Image, Advective Velocities, Dynamic Topography, and Surface Drifter Trajectories, EOS, Vol. 67, No. 22, 1986.

Fiadeiro, M.E., Veronis, G., On The Determination of Absolute Velocities in the Ocean, Journal of Marine Research, Vol. 40, 159-182, 1982.

Fiadeiro, M.E., Veronis, G., Comments on "On The Determination of Absolute Velocities in the Ocean", Journal of Marine Research, Vol. 42, 259-262, 1984.

Finley, R.J., Baumgardner, R.W., Interpretation of Surface-Water Circulation, Aransas Pass, Texas, Using Landsat Imagery, Remote Sensing of Environment 10:3-22, 1980.

Foley, J.D., Van Dam, A., Fundamentals of Interactive Computer Graphics, 1982.

Journel, A.G., Géostatistique minière, Centre de géostatistique, Tome 1 et 2, 1977.

Karabasheva, E.I., Pozdynin, V.D., Statistical Description of Horizontal Surface Temperature Gradients in the North Atlantic and Norwegian Sea, Oceanology, Vol. 18, No. 4, 1978.

Karabasheva, E.I., Paka, V.T., Fedorov, K.N., How Frequent are Thermal Fronts in the Ocean ?, Oceanology, Vol. 18, No. 6, 1978.

Kendall, M.G., Stuart, A., The Advanced Theory of Statistics, Vol. 2, 1967.

Keys, R.G., Cubic Convolution Interpolation for Digital Image Processing, IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Vol. ASSP-29, No. 6, 1981.

Laffitte, P. et al., Traité d'informatique géologique, 1972.

Matheron, G., La théorie des variables régionalisées et ses applications, Les cahiers du Centre de Morphologie Mathématique de Fontainebleau, Fascicule 5, 1970.

Meaille, R., Conception de méthodes intégrées d'élaboration de scénarios de développement/environnement, CTAMN/87/R/09, 1987.

Monget, J.M., Cours de télédétection, CTAMN/86/R/16, 1986.

Prather, M.J., Numerical Advection by Conservation of Second-Order Moments, Journal of Geophysical Research, Vol. 91, No. 6, 6671-6681, 1986.

Wald, L., Utilisation du satellite NOAA 5 à la connaissance de la thermique océanique. Etude de ses variations saisonnières en mer Ligure et de ses variations spatiales en Méditerranée, Thèse 3ème cycle, Université Paris 6, 1980.

Wald, L., Monget J.M., Télédétection en Méditerranée, Méditerranée, Nos. 2 et 3, 1981.

Wald, L., Predictability of the oceanic current field from routine satellite surveys of the sea surface temperature field, CTAMN/83/R/05, 1983.

Wald, L., Calcul du champ de courant de surface à partir d'un couple de thermographies obtenues par satellite : application au golfe de Guinée, CTAMN/85/R/15, 1985.

Wilson, W.H., Smith, R.C., Nolten, J.W., The CZCS Geolocation Algorithms, Visibility Laboratory La Jolla, California, 1981.

Wunsch, C., Can a Tracer Field Be Inverted for Velocity ?, Journal of Physical Oceanography, Vol. 15, 1521-1531, 1985.

Yu, Z., Reconnaissance automatique des formes appliquée à la géologie structurale, Thèse d'Université, Université de Nice, 1987.

Table des matières

	<u>Page</u>
Remerciements	3
Chapitre 1 Introduction	4
Chapitre 2 Différentes méthodes de cartographie du courant à partir de thermographies	7
2.1 Equation géostrophique ou du vent thermique	9
2.2 Suivi des structures	10
2.3 Equation de conservation de la chaleur	10
PARTIE 1 : LE MODELE PHYSIQUE ET SA RESOLUTION NUMERIQUE	11
Chapitre 3 Utilisation de l'équation de conservation de la chaleur	12
3.1 Principe	13
3.2 La résolution numérique	15
3.3 Commentaires sur la généralité de la méthode	17
3.4 Présentation du traitement numérique	22
PARTIE 2 : OBTENTION DES THERMOGRAPHIES A PARTIR D'IMAGES SATELLITAIRES	23
Chapitre 4 Etalonnage du capteur satellitaire et corrections atmosphériques	24
4.1 Etalonnage du capteur AVHRR des satellites NOAA	25
4.2 Correction des effets atmosphériques	29
PARTIE 3 : TRAITEMENT DES IMAGES : GEOMETRIE D'ACQUISITION, FILTRAGE, GRADIENT ET INTERPOLATION	33

Chapitre 5	Modification de la géométrie d'acquisition des images	34
5.1	Egalisation des pixels de l'image	35
5.2	Mise en coïncidence géométrique des images par méthode analytique	37
5.3	Mise en coïncidence géométrique des images par estimation statistique avec prise d'amers	42
5.3.1	Corrélation	42
5.3.2	Calcul du modèle et rectification	46
Chapitre 6	Filtrage	47
6.1	Bruit instrumental	48
6.2	Bruit induit par la correction atmosphérique	51
6.3	Détermination d'échelle critique et élimination des échelles inférieures	53
6.4	Les différents filtres	54
Chapitre 7	Moyenne d'images, dérivée temporelle et cartographie des isophotes	59
7.1	Moyenne d'images	60
7.2	Dérivée temporelle d'images	61
7.3	Cartographie des isophotes	61
Chapitre 8	Interpolation des isophotes d'une image	62
8.1	Transformée en distance	63
8.1.1	Connexité	65
8.1.2	Cas des 4 connexes, algorithme de Rosenfeld (1966) ..	66
8.1.3	Cas des 8 connexes, algorithme de Yokoi et al. (1981)	68
8.1.4	Précision des deux algorithmes	71
8.2	Interpolation point par point	73
8.3	Interpolation plage par plage	75
8.4	Comparaison des deux méthodes d'interpolation	77
Chapitre 9	Calcul du gradient normal à l'isophote	80

PARTIE 4 : RESOLUTION DU MODELE NUMERIQUE A L'AIDE DE THERMOGRAPHIES	83
Chapitre 10 Calcul de la fonction de courant	84
10.1 Initialisation de la fonction de courant	85
10.2 Zones raccordées à la côte	85
10.3 Zones non raccordées à la côte	91
10.3.1 Conservation du courant sur une zone de faibles dimensions	91
10.3.2 Conservation de la composante perpendiculaire du courant	91
10.3.3 Ajustement statistique	92
10.3.4 Continuité de la fonction de courant	92
10.4 Interpolation bilinéaire	94
Chapitre 11 Erreurs sur l'estimation de la fonction de courant	95
Chapitre 12 Calcul et cartographie du vecteur courant	99
PARTIE 5 : EXEMPLES ET CONCLUSION	107
Chapitre 13 Exemples de calcul du courant marin de surface	108
13.1 Un tourbillon issu du Gulf Stream	109
13.2 Le courant Ligure dans le golfe du Lion	119
Chapitre 14 Conclusion et perspectives	127
Liste des illustrations	132
Références bibliographiques	139
Bibliographie	143